Н. П. ЕРМОЛИН

РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ



Н. П. ЕРМОЛИН

РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Издание второе,
исправленное и дополненное



«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1973

6П2. 12
Е 74
УДК 621.313.36.026.44.001.24

Ермолин Н. П.
Е74 Расчет коллекторных машин малой мощности. Изд. 2-е. Л., «Энергия», 1973.
216 с. с ил.

В книге излагается в систематизированной форме расчет различных типов малых коллекторных машин, широко применяемых в различных автоматических устройствах, летательных аппаратах, бытовых приборах и других областях.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся проектированием и производством коллекторных машин малой мощности, и для студентов высших технических учебных заведений при курсовом и дипломном проектировании.

Е $\frac{3310-341}{051(01)-73}$ 110-73 6П2.12

Рецензент В. А. Прозоров.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие ко второму изданию 5
Основные обозначения 7
Введение 11

Глава первая. **Расчет машин постоянного тока малой мощности с электромагнитным возбуждением** 13

1-1. Требования, предъявляемые к машинам малой мощности, и их конструктивное оформление . . . . —
1-2. Основные размеры машины 18
1-3. Обмотка якоря 25
1-4. Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря 28
1-5. Коллектор, щеткодержатели и щетки 40
1-6. Магнитная система машины 47
1-7. Расчет обмотки возбуждения 56
1-8. Потери и коэффициент полезного действия машины 59
1-9. Расчет двигателей постоянного тока со стабилизацией скорости вращения центробежным вибрационным регулятором . 68
1-10. Расчет исполнительных двигателей постоянного тока малой мощности 75
1-11. Особенности расчета исполнительного двигателя для реверсивной установки постоянного тока 77

Глава вторая. **Расчет процессов безреостатного пуска и реверса двигателей постоянного тока малой мощности** 97

✓ 2-1. Расчет безреостатного пуска и реверса электродвигателей независимого и параллельного возбуждения при предварительно включенной в сеть обмотке возбуждения 98
2-2. Расчет безреостатного пуска и реверса электродвигателей параллельного и смешанного возбуждения при одновременном включении в сеть обмоток якоря и возбуждения 102
2-3. Расчет безреостатного пуска и реверса электродвигателей последовательного возбуждения 104
2-4. Упрощенный расчет процессов безреостатного пуска и реверса малых двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения при предварительно включенной в сеть обмотке возбуждения 105

Глава третья. **Расчет серии электродвигателей постоянного тока малой мощности** 108

Глава четвертая. **Расчет машин постоянного тока с возбуждением постоянными магнитами** 114

4-1. Характеристики постоянных магнитов . . . . —
4-2. Конструкции магнитных систем малых машин с постоянными магнитами и реакция якоря в этих машинах 116
4-3. Порядок расчета машин с постоянными магнитами 119
4-4. Проверка длины постоянного магнита полюса машины . . 120

Глава пятая. **Расчет электромашинных усилителей малой мощности с поперечным полем** 128

5-1. Задание на проектирование 130
5-2. Основные размеры ЭМУ . . . . —
5-3. Обмотка якоря и коллектор 132
5-4. Магнитная система ЭМУ 135
5-5. Потери и коэффициент полезного действия ЭМУ 142

Глава шестая. **Расчет одноякорных преобразователей малой мощности** 154

6-1. Задание на проектирование 155
6-2. Основные размеры преобразователя . . . . —
6-3. Обмотка якоря 158
6-4. Магнитная система преобразователя 159

Глава седьмая. **Расчет универсальных коллекторных двигателей малой мощности** 176

7-1. Задание на проектирование 177
7-2. Основные размеры двигателя 178
7-3. Якорь двигателя 181
7-4. Магнитная система двигателя . . . .
7-5. Обмотки возбуждения универсального коллекторного двигателя 183
7-6. Потери и коэффициент полезного действия универсального коллекторного двигателя 189

Глава восьмая. **Тепловой расчет коллекторных машин малой мощности** 191

8-1. Общие замечания . . . . —
8-2. Превышение температуры якоря 192
8-3. Превышение температуры коллектора 193
8-4. Превышение температуры обмотки возбуждения . . . . . . —
8-5. Упрощенный тепловой расчет коллекторных машин 196

Приложения 198
Список литературы 214

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

За период с момента выхода в свет первого издания книги (1955 г.) и до настоящего времени теория и расчет коллекторных машин малой мощности в диапазоне мощностей от долей ватта до нескольких сотен ватт получили свое дальнейшее уточнение и развитие. В настоящее время эти машины имеют широкое и разнообразное применение в различных областях новой техники — в автоматических устройствах, летательных аппаратах и многих других областях, а также в ряде приборов домашнего быта.

Производство и выпуск малых коллекторных машин указанного диапазона мощностей в Советском Союзе и других странах исчисляется сейчас многими миллионами штук в год. Это связано с огромным расходом активных материалов — листовой электротехнической стали, обмоточной меди и алюминия, электроизоляционных и других материалов — на изготовление этих машин. При организации массового производства и выпуска их возникают вопросы рационального проектирования таких машин для различного назначения в целях получения технически и экономически обоснованных габаритных, весовых и других показателей.

В связи с этим во втором издании настоящей книги получили свое отражение современные вопросы проектирования малых коллекторных машин постоянного и переменного тока. Так как в книгу включены дополнительные вопросы по расчету коллекторных машин, то структура второго издания ее несколько отличается от первого: кроме изложения в переработанном виде рассмотренных в первом издании вопросов расчета малых коллекторных машин, введены новые дополнения по проектированию этих машин, как, например, расчет электромашинных усилителей с поперечным полем, исполнительных двигателей постоянного тока при разных режимах работы, расчет малых двигателей со стабилизацией скорости вращения посредством центробежного вибрационного регулятора и др.

В отличие от первого издания книги для количественной оценки различных электрических, магнитных и тепловых величин в данной книге применяется Международная система единиц СИ по ГОСТ 9867—61. Основными единицами этой системы являются: метр, килограмм, секунда, Ампер, Кельвин и Кандела. Однако в целях удобства измерения некоторых величин Международная си-

стема единиц и указанный Государственный стандарт предусматривают также использование на практике кратных и дольных единиц, образуемых умножением или делением основных или производных единиц на степень числа 10.

Так как в данной книге рассматриваются коллекторные машины малой мощности в диапазоне мощностей от долей ватта до нескольких сотен ватт, то габаритные размеры их обычно измеряются величинами порядка нескольких сантиметров, а отдельные их детали — долями сантиметра. Поэтому в целях практического удобства для измерения линейных размеров этих машин и ряда других величин целесообразно использовать допускаемые Государственным стандартом дольные единицы длины. Так, например, в качестве дольных единиц длины в книге приняты: для измерения размеров и некоторых других величин рассматриваемых машин $1\ см = 1 \cdot 10^{-2}$ м, а для размеров обмоточных проводов, толщины изоляции и других малых величин $1\ мм = 1 \cdot 10^{-3}$ м. Кроме того, в книге сохранены также некоторые внесистемные единицы по ГОСТ 7664—61, имеющие широкое практическое распространение. Например, для измерения скорости вращения электрической машины в книге сохранены обороты в минуту ($1\ об/мин = \frac{\pi}{30}$ рад/с), а для измерения температуры машины и ее частей — градус Цельсия (°C).

Замечания и пожелания по книге просьба направлять по адресу: 192041, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение издательства «Энергия».

Автор

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A_2 — линейная нагрузка якоря
B_δ, $B_{з2}$, $B_{с2}$, $B_п$, $B_{с1}$ — индукции в воздушном зазоре, зубцах и сердечнике якоря, сердечнике полюса и станине
B_r — остаточная индукция в постоянном магните
b — действительная полюсная дуга
b_0 — расчетная полюсная дуга
$b_{п2}$ — ширина паза якоря
$b_п$ — ширина сердечника полюса
$b_к$ — ширина коммутационной зоны
$b_щ$ — ширина щетки по окружности коллектора
b_β — приведенный к окружности якоря сдвиг щеток с нейтрали
$b'_{з2}$, $b''_{з2}$ — максимальная и минимальная ширина зубца якоря
C — машинная постоянная
c — постоянная обмотки якоря
$D_{н2}$, $D_к$ — диаметры якоря и коллектора
d_2, d_1 — диаметры проводов обмоток якоря и возбуждения
$d_п$, $d_{вл}$ — диаметры паза якоря и вала
E, $E_Н$, $E_В$ — э. д. с. якоря (Н — низшее, В — высшее напряжение)
e_a — э. д. с от поля якоря в короткозамкнутой секции
e_p — средняя реактивная э. д. с. в секции
e — среднее значение результирующей э. д. с. в секции
e_t — трансформаторная э. д. с. в секции
$F_в$ — м. д. с. возбуждения на пару полюсов
F_q, F_β, $F_к$ — поперечная, продольная и коммутационная м. д. с. якоря
F_R — суммарная м. д. с. якоря
F_δ, $F_{з2}$, $F_{с2}$, $F_п$, $F_{с1}$ — м. д. с. для воздушного зазора, зубцов и сердечника якоря, сердечников полюсов и станины
f_2 — частота перемагничивания стали якоря
f_1 — частота сети переменного тока
f_0, f'_0 — технологические коэффициенты, учитывающие неточности укладки проводов в пазы якоря и намотки рядов в катушке возбуждения
$G_{с2}$, $G_{з2}$, $G_{с1}$, $G_{с.п}$ — массы (вес) стали сердечника и зубцов якоря, станины и полюсов
$H_{з2}$, $H_{с2}$, $H_п$, $H_{с1}$ — удельные м. д. с. отдельных участков системы

H_c — коэрцитивная сила в постоянном магните
h_{c2}, $h_{п2}$, $h_п$, h_{c1} — высоты сердечника и паза якоря, сердечника полюсов и станины
$h_щ$ — высота щетки
I_2, $I_в$ — токи якоря и возбуждения
$I_ш$ — ток параллельного возбуждения
i_2 — относительное значение тока якоря в долях номинального значения
i_{2m} — кратность пускового тока в долях номинального тока якоря
J — момент инерции якоря
j_2, j_1, $j_щ$ — плотности тока в проводниках обмоток якоря и возбуждения и под щетками
K — число коллекторных пластин
$k_{п.и}$ — коэффициент заполнения паза якоря изолированным проводом
k_δ — коэффициент воздушного зазора
L_2' — индуктивность обмотки якоря
L_{c2}, $L_{з2}$, $L_п$, L_{c1} — средние длины путей магнитного поля в сердечнике и зубцах якоря, сердечниках полюсов и станине
l_0, $l_к$, $l_п$, l_1 — осевые длины пакета якоря, коллектора, полюса и станины
$l_{ср2}$ — средняя длина проводника обмотки якоря
$l_{ср1}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения
M_2 — полезный вращающий момент двигателя
M_0 — момент магнитных и механических потерь двигателя
$m_п$ — кратность наибольшего пускового момента по отношению к номинальному вращающему моменту
N_2 — число проводников обмотки якоря
$N_{п2}$ — число проводников в пазу якоря
n — скорость вращения машины
P_2 — номинальная полезная мощность машины
$P_а$ — расчетная мощность машины
$P_{м2}$, $P_{м1}$, $P_{щ.к}$, $\Sigma P_с$, $P_{мх}$ — потери в обмотках якоря и возбуждения, переходном контакте щеток и коллектора, магнитные в стали якоря и механические
p — число пар полюсов машины
$Q_п$ — площадь паза якоря
$Q_п$, Q_{c1} — поперечные сечения сердечника полюса и станины
$Q_в$ — площадь окна для размещения обмотки возбуждения
q — удельная тепловая загрузка поверхности якоря
$q_2 q_1$ — поперечные сечения голых проводов обмоток якоря и возбуждения
$R_щ$ — среднее переходное сопротивление контакта щеток
r_2, $r_в$ — омическое сопротивление обмоток якоря и возбуждения
$S_щ$ — площадь сечения щетки
S_1, S_2, S_3, S_4 — соответствующие поверхности охлаждения катушки возбуждения
S_c', S_c'' — внутренняя и наружная поверхности охлаждения станины
$S_{н2}$, $S_к$, S_0 — поверхности охлаждения якоря, коллектора и катушки возбуждения

s_1, s_2 — корни характеристического уравнения

$T_к$ — период коммутации тока в секции якоря

$T_2, T_в, T_с$ — постоянные времени цепей якоря, основной и последовательной обмоток возбуждения

$T_{2с}$ — общая постоянная времени последовательной цепи якоря и обмотки возбуждения

$T_М$ — электромеханическая постоянная времени якоря двигателя

$T_р, T_п$ — постоянные времени нагревания и охлаждения якоря

t_m — время наступления максимума пускового тока двигателя

t_2, t'_2 — шаги по вершинам и основаниям зубцов якоря

$U, U_Н, U_В$ — номинальные напряжения на зажимах машины

u — мгновенное относительное значение напряжения на зажимах двигателя в долях номинального значения его

$u_к, u_Н, u_В$ — числа секционных сторон в одном слое паза якоря

$v_2, v_к$ — окружные скорости вращения якоря и коллектора

$W_с, W_ш$ — число витков обмотки возбуждения на полюс

$w_{с2}$ — число витков в секции обмотки якоря

$w_{м2}, w_{с2}$ — удельные потери в обмотке и стали якоря

y, y_1, y_2 — результирующий, первый и второй частичные шаги обмотки якоря по секциям

$y_п, y_к$ — шаги обмотки якоря по пазам и коллектору

z_2 — число пазов якоря

α — коэффициент полюсного перекрытия

α' — коэффициент теплоотдачи поверхности якоря в спокойной среде

α_a — то же вращающегося якоря

$\alpha'_с, \alpha''_с$ — коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей станины

$\alpha_к, \alpha''_0$ — коэффициенты теплоотдачи поверхностей коллектора и катушки возбуждения

$\alpha'_0, \beta'_0, \gamma'_0$ — начальные относительные значения тока якоря, полезного магнитного поля и угловой скорости вращения якоря в долях номинальных значений их

β — общая толщина изоляции от меди до стенки паза якоря

$\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения в контактах щеток

δ — длина одностороннего воздушного зазора машины

$\varepsilon, \varepsilon_2, \varepsilon_щ, \varepsilon_в$ — относительные падения напряжения в двигателе при номинальных условиях

$\varepsilon_{м0}, \varepsilon_м$ — относительные моменты в двигателе при номинальных условиях

η — коэффициент полезного действия машины

ξ — отношение $l_0/D_{н2}$

η', ξ', ζ' — установившиеся относительные значения тока якоря, полезного магнитного поля и угловой скорости вращения якоря в долях номинальных значений их

λ_2 — удельная магнитная проводимость для полей рассеяния секции обмотки якоря

λ' — коэффициент теплопроводности междувитковой и пазовой изоляции

s, ν — корни характеристического уравнения

σ — коэффициент магнитного рассеяния машины

Φ_δ — полезное магнитное поле полюса в воздушном зазоре

φ — относительное значение полезного поля в долях номинального значения его

ω — относительное значение угловой скорости вращения якоря в долях номинального значения ее

τ_2 — полюсный шаг

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование электрической машины слагается из расчета и конструирования ее. Расчет машины в общем представляет собой математически неопределенную задачу со многими решениями, так как число определяемых неизвестных больше числа уравнений, связывающих их. Вследствие этого в процессе расчета электрической машины приходится задаваться определенными значениями некоторых исходных электромагнитных и конструктивных величин, базируясь на опыте построенных машин. В связи с этим при проектировании новой машины обычно получается несколько расчетных вариантов ее, из которых и выбирается наивыгоднейший.

Результаты расчета электрической машины достаточно согласуются с опытом лишь при проектировании машин средней и большой мощности. В этом случае расчетные данные могут расходиться с соответствующими опытными значениями построенной машины в среднем на $\pm$ 10% (характеристика холостого хода, потери, ток возбуждения, ток холостого хода электродвигателей переменного тока и т. д.). Расхождение между расчетными и опытными данными машины вызывается в основном непостоянством свойств применяемых в ней магнитных материалов и неизбежными погрешностями технологического процесса изготовления ее.

Еще менее точным оказывается расчет малых электрических машин в диапазоне мощностей от долей ватта до нескольких сотен ватт, так как в этих машинах относительно возрастают побочные явления (падения напряжения, отдельные потери и т. д.), не все поддающиеся точному расчету. Достаточно указать, что потери в малых электродвигателях могут составлять от 40 до 95% подводимой мощности из сети.

Кроме того, в отличие от производства машин средней и большой мощности погрешности технологического процесса при изготовлении машин малой мощности проявляются в значительно большей степени. Поэтому в целях уменьшения этих погрешностей при производстве указанных машин для обработки и сборки их деталей применяются методы высокого класса точности.

Электрические машины малой мощности применяются на практике преимущественно в качестве электродвигателей, хотя встречаются специальные установки, в которых имеют применение также и генераторы, и преобразователи малой мощности.

Так, например, в связи с автоматизацией управления рабочими процессами и механизмами в ряде отраслей промышленности и установках специального назначения широкое применение получили различные малые электродвигатели в диапазоне мощностей от долей ватта до нескольких сотен ватт. В частности, большое значение в них имеют электродвигатели постоянного тока малой мощности.

Разнообразное применение в практике получили также малые универсальные коллекторные электродвигатели, работающие от сетей постоянного и переменного тока. Они широко используются, например, в телеграфных аппаратах, в устройствах автоматики и телемеханики, в часовой промышленности и т. д. Коллекторные двигатели переменного тока находят большое применение и в установках домашнего быта, как-то: в вентиляторах, швейных машинах, пылесосах и др.

Однако наряду с широким и разнообразным использованием для практических целей указанных электродвигателей малой мощности в ряде областей техники имеют применение также малые генераторы, электромашинные усилители с поперечным полем и преобразователи постоянного тока мощностью в несколько десятков или сотен ватт. К этим областям относятся, например, некоторые установки проводной связи, радиоустройства и др.

Настоящая книга имеет своей целью дать систематизированный расчет генераторов и электродвигателей постоянного тока малой мощности, электромашинных усилителей, одноякорных преобразователей постоянного тока и универсальных коллекторных двигателей в диапазоне мощностей до нескольких сотен ватт. Для облегчения проектирования этих машин отдельные этапы расчета их разделены на позиции, расположенные в логической последовательности друг за другом.

В книге рассматриваются основные требования, предъявляемые к проектируемым типам малых машин, дается краткое описание конструктивных особенностей их, приводятся расчетные формулы, необходимые кривые и таблицы с соответствующими пояснениями к ним и даны примеры расчета некоторых машин.

Для того чтобы иметь возможность рассчитать электрическую машину малой мощности, проектирующий ее должен иметь в распоряжении исходные данные для расчета в виде определенного задания или технических требований.

Расчетный формуляр проектируемого генератора, электродвигателя, электромашинного усилителя или преобразователя, кроме данных расчета, должен содержать: 1) эскиз паза якоря в разрезе с обмоткой и изоляцией в масштабе; 2) развернутую схему обмотки якоря; 3) эскиз магнитной цепи машины в масштабе; 4) рабочие характеристики машины.

Проектирование этих машин заканчивается выполнением в масштабе чертежей конструкции их в соответствующих видах.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

РАСЧЕТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

1-1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАШИНАМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ, И ИХ КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ

Электродвигатели

Малые электродвигатели постоянного тока мощностью от долей ватта до нескольких сотен ватт широко применяются для привода механизмов в различных автоматических устройствах. К таким электродвигателям предъявляются разнообразные требования в отношении режима работы, пусковых и рабочих свойств в зависимости от условий их эксплуатации.

В ряде случаев эти электродвигатели работают в кратковременном или повторно-кратковременном режимах с рабочим периодом в пределах от одной до пяти—десяти минут и частым реверсированием. Вместе с тем они нередко должны обладать большим пусковым вращающим моментом и возможно малой электромеханической постоянной времени.

В других случаях требуются малые электродвигатели, постоянного тока, работающие продолжительно при постоянной скорости вращения, как, например, в гироскопических устройствах, приводе вентиляторов, сирен, дрелей и т. д.

В конструктивном отношении электродвигатели постоянного тока малой мощности, особенно двигатели для привода различных механизмов автоматических устройств и бытового назначения, в настоящее время выполняются закрытого типа. В них должна предусматриваться соответствующая защита и экранировка металлическими оболочками всех электрических частей в целях ограничения радиопомех, создаваемых этими двигателями при работе.

Магнитная система малых двигателей постоянного тока выполняется или в виде сплошной стальной станины с отъемными цельными или шихтованными полюсами (рис. 1.13, *а*), или же в виде шихтованной станины вместе с полюсами (рис. 1.13, *б*). При мощ-

ностях электродвигателей примерно до 150—200 вт магнитная система делается двухполюсной; при больших же мощностях выгодно выполнять ее четырехполюсной, так как этим достигается некоторое уменьшение массы (веса) машины и длины коллектора.

Однако в настоящее время при проектировании и изготовлении электродвигателей постоянного тока малой мощности специального назначения наметилась тенденция к выполнению их четырехполюсниками даже при малых мощностях, измеряемых единицами ватт. Это обстоятельство обусловлено стремлением к повышению надежности работы щеточного узла двигателей за счет параллельной работы на коллекторе двух одноименных щеток из общего числа (четырех) щеткодержателей.

Возбуждение этих электродвигателей большей частью последовательное, так как при этом обеспечивается высокая кратность пускового вращающего момента по отношению к номинальному и облегчается безреостатный пуск двигателей. Однако в тех случаях, когда требуется относительно постоянная скорость вращения их, применяется и параллельное возбуждение, а в специальных случаях также и смешанное, или же возбуждение постоянными магнитами.

Следует отметить, что за последние годы разработка малых электродвигателей постоянного тока в диапазоне мощностей от долей ватта до нескольких сотен ватт характеризуется повышением их технико-экономических показателей. Например, благоприятными результатами в этой области являются:

1) разработка ряда серий малых электродвигателей постоянного тока с большой степенью унификации основных узлов;

2) увеличение срока службы и повышение надежности работы многих типов двигателей;

3) разработка способов стабилизации скорости вращения малых двигателей;

4) улучшение пусковых и рабочих характеристик их и др.

Вместе с этим развитие подшипниковой промышленности, химии и некоторых других отраслей создает условия для дальнейшего улучшения технических данных малых электрических машин в связи с возможностью повышения их скорости вращения и тепловых нагрузок.

В настоящее время отечественная промышленность выпускает большое количество разных типов малых электродвигателей постоянного тока специального назначения. Ниже дается краткая характеристика ряда типов этих двигателей, используемых в специальной технике.

Электродвигатели постоянного тока типов Д, ДП, СД и ДРВ, применяемые в авиационной технике [15], работают при широком изменении температуры окружающей среды в условиях высотности, повышенной влажности и вибрациях мест установки. Они имеют закрытое исполнение с повышенной прочностью щеткодержателей. Для уменьшения электромеханической постоянной времени элек-

тродвигатели указанных типов выполняются с удлиненными якорями. Они используются в качестве приводных и исполнительных двигателей в авиационной аппаратуре.

Электродвигатели типа Д имеют двухполюсное исполнение с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Они используются как приводные двигатели. Крепление их фланцевое со стороны выходного вала. Напряжение питания 27 В, полезная мощность на валу от 1 до 55 Вт при скоростях вращения от 7000 до 2000 об/мин. Условные обозначения применяемых типов этих двигателей: Д-1, Д-7, Д-25, Д-35, Д-55, где цифра после буквы Д соответствует мощности на валу.

Электродвигатели типа ДП представляют собой малогабаритные исполнительные двигатели с возбуждением постоянными магнитами. Они используются в маломощных следящих автоматических системах. Напряжение питания 27 В, полезная мощность на валу от 1 до 10 Вт при скоростях вращения от 8000 до 4000 об/мин. Эти двигатели используются также с центробежным вибрационным регулятором скорости как приводные двигатели.

Электродвигатели типа СД представляют собой двух- и четырехполюсные машины с параллельным или последовательным возбуждением. Они используются для привода авиационной аппаратуры. Крепление двигателей фланцевое со стороны выходного вала. Напряжения питания 27 и 60 В, полезная мощность на валу от 8 до 250 Вт при скоростях вращения 7500 и 6000 об/мин.

Электродвигатели типа ДРВ являются двухполюсными машинами с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением и с центробежным вибрационным регулятором скорости. Крепление двигателей фланцевое со стороны выходного вала. Эти двигатели со стабилизированной скоростью вращения применяются в качестве приводных в авиационной аппаратуре. Напряжение питания 27 В, полезная мощность на валу от 20 до 300 Вт при скоростях вращения 10 000, 7500 и 6000 об/мин.

Электродвигатели постоянного тока типа ПЛ представляют собой малогабаритные машины защищенного исполнения с параллельным возбуждением. Эти двигатели используются в системах автоматики как приводные для различных приборов. Они имеют два способа крепления — фланцевое и на лапах. Напряжения питания 110 и 220 В, полезные мощности на валу от 80 до 600 Вт при скоростях вращения 2700 и 1400 об/мин (приложение IX).

Электродвигатели постоянного тока типа СЛ имеют двухполюсное исполнение с независимым, параллельным и последовательным возбуждением. Эти двигатели широко применяются в схемах корабельной автоматики, в следящих системах и различных регуляторах в качестве вспомогательных и исполнительных двигателей.

Конструктивно эти двигатели выполняются в виде цилиндра без крепежных лап, имеют защищенное исполнение и условный трехцифровой шифр, в котором первая цифра обозначает габарит двигателя, вторая — длину и третья — схему включения двигателя.

Напряжения питания двигателей СЛ 24, 110 и 220 В, полезные мощности на валу от 5 до 230 Вт при скоростях вращения от 5200 до 2400 об/мин.

Имеются исполнения этих двигателей со стабилизированной скоростью вращения посредством центробежного вибрационного регулятора скорости. Напряжения питания 24 и 110 В, полезные мощности на валу от 3 до 80 Вт при стабилизированных скоростях вращения 4500—3000 об/мин (приложение X).

Электродвигатели постоянного тока типа МИ имеют водозащищенное и закрытое исполнение и четырехполюсную магнитную систему с независимым и параллельным возбуждением. Они используются в судовых системах автоматического управления и силовом следящем электроприводе с электромашинным усилителем. Двигатели параллельного возбуждения применяются в качестве приводных, а независимого возбуждения — как исполнительные двигатели с якорным управлением. Эти двигатели имеют фланцевое крепление со стороны приводного вала или на лапах.

Напряжения питания двигателей типа МИ первых трех габаритов 60 и 110 В, полезные мощности на валу от 100 до 760 Вт при скоростях вращения 3000, 2000 и 1000 об/мин.

Электродвигатели постоянного тока серии ДПМ и ДПР с возбуждением постоянными магнитами [17] в диапазоне мощностей от долей ватта до нескольких десятков ватт имеют широкое применение для привода различных механизмов и в системах автоматического управления в качестве исполнительных двигателей.

Электродвигатели серии ДПМ являются двухполюсными машинами закрытого исполнения с возбуждением от внешнего кольцевого постоянного магнита. Они имеют обыкновенный якорь с пазами с уложенной в них простой петлевой обмоткой. Эта серия двигателей построена на четырех габаритах, наружный диаметр корпусов которых, выраженный в миллиметрах, входит в обозначение двигателя (например, ДПМ-20, ДПМ-25 и т. д.).

Двигатели серии ДПМ имеют разные конструктивные исполнения: с одним выходным концом вала (исполнение Н1), с двумя концами вала (Н2) и с одним концом вала и встроенным центробежным регулятором скорости (Н3). В каждом из этих исполнений предусмотрено выполнение двигателей с разными номинальными данными: напряжение питания 6, 12 и 27 В, момент нагрузки 0,02—2 Н·см и скорость вращения 9000—2500 об/мин (приложение XI).

Электродвигатели серии ДПР являются двухполюсными машинами закрытого исполнения с возбуждением от внутреннего цилиндрического постоянного магнита. Они имеют полый бескаркасный якорь, внутри которого располагается упомянутый двухполюсный цилиндрический магнит, и наружный магнитопровод в виде цилиндра для замыкания магнитного поля. Данные двигатели имеют более высокий к. п. д., меньшую электромеханическую постоянную времени и больший срок службы. Серия двигателей ДПР построена на шести габаритах и охватывает диапазон мощностей от 0,12 до

37 Вт. За исходный параметр для построения данной серии здесь также принят наружный диаметр корпуса двигателей. Наименьший диаметр корпуса принят 15 мм; диаметр корпуса каждого следующего габарита возрастает на 5 мм.

Двигатели серии ДПР имеют разные конструктивные исполнения: с одним выходным концом вала (исполнение Н1), с двумя концами вала (Н2); фланцевое с одним концом вала (Ф1) и фланцевое с двумя концами вала (Ф2). В каждом из этих исполнений предусмотрено выполнение двигателей с разными номинальными данными [17].

Генераторы

Генераторы постоянного тока мощностью в несколько десятков или сотен ватт применяются в некоторых установках проводной связи, радиоустройствах, автомашинах и др. В зависимости от типа установки эти генераторы работают в продолжительном или кратковременном режиме. Для вращения их применяется как двигательный, так и ручной привод. Применение ручного привода для малых генераторов возможно только при мощностях их не более нескольких десятков ватт.

Генераторы постоянного тока малой мощности обычно выполняются закрытого типа в целях экранировки электрических частей для ограничения радиопомех.

Так, например, р а д и о г е н е р а т о р ы постоянного тока малой мощности имеют закрытое исполнение и двух- или четырехполюсную магнитную систему. Они обычно строятся с двумя рабочими обмотками в общих пазах якоря и двумя коллекторами — на низшее и высшее напряжения. Низшее напряжение предназначается для питания цепей накала, а высшее — анодных цепей радиоустройств. Эти генераторы имеют параллельное возбуждение от коллектора низшего напряжения. Ввиду общей магнитной системы и одной обмотки возбуждения генератора самостоятельная регулировка каждого напряжения его невозможна. Поэтому в малых радиогенераторах регулирование напряжений обычно не применяется.

Для вращения радиогенераторов обычно применяются двигатели внутреннего сгорания, но при самых малых мощностях иногда используется также и ручной привод.

В других малых генераторах постоянного тока для создания рабочего магнитного поля применяется как независимое и параллельное возбуждение, так и возбуждение постоянными магнитами. Последнее находит применение, например, в тахогенераторах и некоторых других случаях.

Ко всем электродвигателям и генераторам постоянного тока малой мощности предъявляются как общие, так и специальные технические требования. Последние определяются особыми техническими условиями заказа на данный тип двигателя или генератора в зависимости от специального их назначения.

Главнейшими общими техническими требованиями к этим машинам являются:

а) высокая надежность работы машин при всех условиях эксплуатации;

б) благоприятная коммутация машин при любых режимах работы;

в) получение необходимых показателей рабочих характеристик машин;

г) обеспечение большой краткости пускового вращающего момента электродвигателя по отношению к номинальному и в случае исполнительных двигателей получение малой электромеханической постоянной времени;

д) обеспечение возможного постоянства напряжения на зажимах генератора при различных режимах работы;

е) высокий коэффициент полезного действия генератора;

ж) способность генератора выдерживать короткие замыкания;

з) достижение минимальных габаритов и массы (веса) машин;

и) наличие защиты и экранировка электрических частей машин для ограничения радиопомех, создаваемых ими при работе;

к) правильное использование активных материалов и рациональная организация технологии производства малых машин в целях уменьшения их стоимости.

Задание на проектирование

Основой для расчета малых машин постоянного тока являются следующие данные: 1) полезная мощность машины P_2, Вт; 2) напряжение на зажимах U, В; 3) скорость вращения n, об/мин; 4) возбуждение (последовательное, параллельное, смешанное, постоянными магнитами); 5) режим работы (продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный); 6) исполнение (закрытое, защищенное).

При расчете радиогенераторов задаются два значения рабочего напряжения и мощность каждого коллектора. Малые электродвигатели постоянного тока, вообще говоря, строятся на разные напряжения, а именно: 6, 12, 27, 110, и 220 В. Однако в зависимости от назначения и области применения этих двигателей не все указанные напряжения имеют одинаковое распространение. Малые двигатели постоянного тока целесообразно строить по возможности более высокоскоростными, так как при этом получаются выгодными значения к. п. д., массы (веса) и габаритов двигателя.

Употребительными напряжениями малых радиогенераторов являются: низшее напряжение — 4 и 15 В, высшее — 220, 500, 750 1000 и 1500 В.

1-2. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ МАШИНЫ

Определение основных размеров машины — диаметра и длины якоря — является одним из важнейших этапов в ходе расчета ее, так как правильно выбранные размеры якоря обеспечивают наи-

более рациональное использование применяемых в машине материалов и более совершенную конструкцию ее в целом.

Якорь малого электродвигателя или генератора постоянного тока представляет собой пакет, собранный из дисков, наштампованных из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Для сборки пакета якоря применяются два способа. По одному из них пакет якоря собирается отдельно от вала на специальном кондукторе-оправке, отдельные диски пакета покрываются бакелитовым лаком, пакет прессуется и затем запекается в печи. В процессе запекания при температуре 120—150° С бакелитовый лак полимеризируется, пакет становится механически прочным и после этого насаживается на вал. По другому способу покрытые лаком диски пакета якоря поодиночке насаживаются на вал, имеющий накатку под пакетом, пакет прессуется и скрепляется двумя нажимными шайбами, запрессованными на накатку вала.

1. Расчетная мощность машины

а. Электродвигатели. Расчетная, или внутренняя, мощность электродвигателей постоянного тока P_a, равная произведению э. д. с. при нагрузке и тока якоря, может быть определена следующим образом:

$$P_a = EI_2 = UI_2 \quad I_2^2 r_2 - \Delta U_{\text{щ}} I_2 = \frac{P_2}{\eta} - P_{\text{м+щ}}.$$

Как показывает расчет и опыт, потери в обмотках и контактах щеток $P_{\text{м+щ}}$ малых электродвигателей продолжительного режима работы в большинстве случаев составляют в среднем около двух третей общих потерь в них:

$$P_{\text{м+щ}} = \frac{2}{3} \sum P = \frac{2}{3} P_2 \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right);$$

тогда расчетная мощность указанных двигателей будет

$$P_a = \frac{P_2}{\eta} - \frac{2}{3} P_2 \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_2, \text{ Вт.}$$

В малых двигателях повторно-кратковременного или кратковременного режимов работы потери в обмотках и контактах щеток большей частью составляют в среднем около трех четвертей общих потерь, поэтому для определения расчетной мощности этих двигателей предыдущая формула принимает вид:

$$P_a = \frac{1+3\eta}{4\eta} P_2, \text{ Вт.}$$

б. Генераторы. В генераторах постоянного тока малой мощности продолжительного режима работы потери в обмотках и контактах щеток в большинстве случаев составляют в среднем около по-

ловины общих потерь, поэтому расчетная мощность такого генератора может быть определена по следующей формуле:

$$P_a = EI_2 = UI + UI_в + I_2^2 r_2 + \Delta U_{щ} I_2 = P_2 + P_{м+щ} =$$

$$= P_2 + \frac{1}{2} \cdot P_2 \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) = \frac{1+\eta}{2\eta} P_2, \text{ Вт},$$

где P_2 — номинальная полезная мощность электродвигателя или генератора в ваттах по заданию; в двухколлекторном генераторе

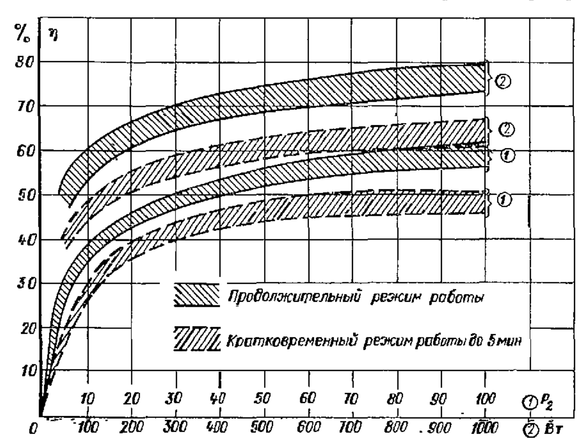


Рис. 1.1. Крвые к. п. д. малых машин постоянного тока в зависимости от полезной мощности на валу

под величиной P_2 понимается суммарная мощность двух обмоток якоря; η — к. п. д. электродвигателя или генератора, предварительно выбираемый по кривым рис. 1.1 в зависимости от полезной мощности и режима работы машины.

Для машин повторно-кратковременного режима работы к. п. д. на 5—10% больше значения, определяемого по кривой рис. 1.1 для машин кратковременного режима той же мощности.

Следует отметить, что некоторое отклонение величины к. п. д. электродвигателя или генератора от истинного значения или же отклонение распределения потерь от принятого выше среднего распределения незначительно влияет на изменение величины диаметра якоря или внутреннего диаметра полюсов, так как последний со-

гласно позиции 4 пропорционален кубическому корню из величины расчетной мощности:

$$D_{я2}=\sqrt[3]{\frac{CP_а}{\xi n}}=\sqrt[3]{P_а}.$$

Так, например, при отклонении величины к. п. д. машины от истинного значения на $\pm$ 10% отклонение расчетного диаметра якоря от точного значения составляет не более $\pm$ 2% при $\eta<0{,}40$ и менее $\pm$ 1% — при $\eta>0{,}40$. Точно так же при возможном отклонении распределения потерь в машине от принятых средних распределений на $\pm$ 10% отклонение расчетного диаметра якоря от величины его при этих распределениях потерь и данном значении к. п. д. составляет не более $\pm$ 5% при $\eta<0{,}40$ и менее $\pm$ 3% — при $\eta>0{,}40$.

Таким образом, приведенные формулы для вычисления расчетной мощности малых электродвигателей и генераторов с достаточной точностью определяют значение этой мощности.

2. Ток и э. д. с. якоря при нагрузке машины

а. Ток якоря электродвигателя при последовательном возбуждении

$$I_2=\frac{P_2}{\eta U},\ \text{А};$$

при параллельном возбуждении

$$I_2=\frac{P_2}{\eta U}-I_ш,\ \text{А}.$$

б. Ток якоря генератора с одним коллектором на якоре и параллельным возбуждением

$$I_2=\frac{P_2}{U}+I_ш,\ \text{А};$$

с двумя коллекторами на якоре и параллельным возбуждением

$$I_{2Н}=\frac{P_{2Н}}{U_Н}+I_ш;\quad I_{2В}=\frac{P_{2В}}{U_В},\ \text{А},$$

где U, $U_Н$ и $U_В$ — номинальные напряжения соответствующих машин по заданию (Н — низшее, В — высшее); P_2, $P_{2Н}$ и $P_{2В}$ — номинальные мощности машин по заданию; η — берется из позиции 4.

Величина тока возбуждения $I_ш$ малых электродвигателей и генераторов постоянного тока параллельного возбуждения обычно составляет 10—20% от величины номинального нагрузочного тока машины, причем больший процент этого тока относится к меньшим

мощностям. В отдельных случаях возможно отклонение тока возбуждения в сторону меньшей или большей величины от указанного значения.

в. Э. д. с. якоря *электродвигателя* при нагрузке предварительно может быть определена, исходя из вышеприведенных выражений для расчетной мощности, по следующим формулам:

для продолжительного режима работы при последовательном возбуждении

$$E = \frac{P_a}{I_2} = \frac{1+2\eta}{3} U, \text{ В};$$

при параллельном возбуждении

$$E = \frac{P_a}{I_2} = \frac{1+2\eta}{3\left(1-\frac{I_ш}{I}\right)} U, \text{ В};$$

для кратковременного режима работы при последовательном возбуждении

$$E = \frac{1+3\eta}{4} U, \text{ В};$$

при параллельном возбуждении

$$E = \frac{1+3\eta}{4\left(1-\frac{I_ш}{I}\right)} U, \text{ В},$$

где I — потребляемый двигателем параллельного возбуждения ток из сети:

$$I = \frac{P_2}{\eta U}, \text{ А},$$

при этом в среднем, как указывалось,

$$\frac{I_ш}{I_2} = 0{,}1 \div 0{,}2.$$

г. Э. д. с. якоря *генератора* с одним коллектором на якоре и параллельным возбуждением

$$E = \frac{P_a}{I_2} = \frac{1+\eta}{2\eta\left(1+\frac{I_ш}{I}\right)} U, \text{ В},$$

с двумя коллекторами на якоре низшего и высшего напряжения и параллельным возбуждением

$$E_н = \frac{1+\eta}{2\eta\left(1+\frac{I_ш}{I_н}\right)} U_н; \quad E_в \approx 0{,}9\frac{1+\eta}{2\eta} U_в, \text{ В},$$

где отдаваемый генератором ток

$$I=\frac{P_2}{U} \text{ или } I_н=\frac{P_{2н}}{U_н}, \text{ А},$$

при этом в среднем

$$\frac{I_ш}{I} \text{ или } \frac{I_ш}{I_н}=0{,}1\div0{,}2.$$

3. Машинная постоянная

Машинная постоянная C определяет диаметр якоря машины $D_{н2}$ и расчетную длину его l_0 в зависимости от расчетной мощности P_a, скорости вращения n, индукции в воздушном зазоре под полюсом

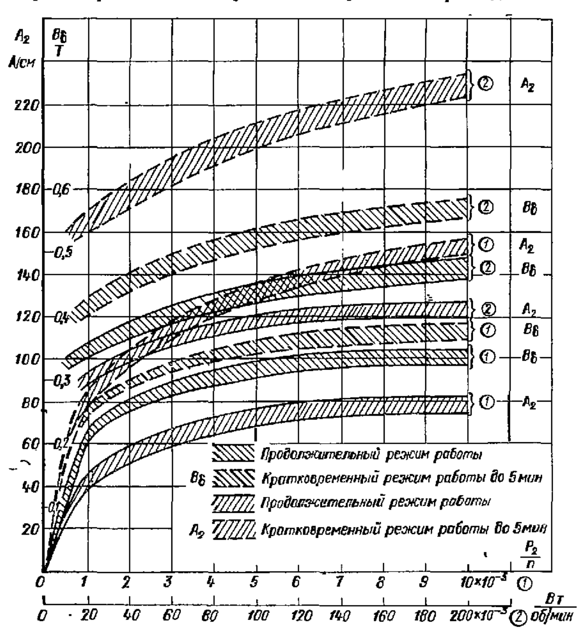


Рис. 1.2. Кривые индукции в воздушном зазоре и линейной нагрузки якоря малых машин постоянного тока в зависимости от отношения полезной мощности к скорости вращения

B_δ и линейной нагрузки якоря A_2. Связь между этими величинами выражается следующим образом [1]:

$$C = \frac{6\cdot 10^4}{\alpha B_\delta A_2} - \frac{D_{\text{п}2}^2 l_0 n}{P_\text{в}},$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре под полюсом при нагрузке, Т; A_2 — линейная нагрузка якоря, А/см; $\alpha = 0{,}60 \div 0{,}70$ — коэффициент полюсного перекрытия.

Индукция B_δ и линейная нагрузка A_2 выбираются в зависимости от отношения полезной мощности к скорости вращения и режима работы машины по кривым рис. 1.2; для машин повторно-кратковременного режима работы можно производить этот выбор также по кривым для кратковременного режима, уменьшив полученные по ним значения этих величин соответственно на 5—7 и 15—20%.

В случае двухколлекторного генератора под A_2 понимается суммарная линейная нагрузка двух обмоток якоря.

4. Диаметр и расчетная длина якоря

В электродвигателях и генераторах постоянного тока малой мощности отношение длины l_0 пакета якоря к его диаметру или внутреннему диаметру полюсов $D_{\text{п}1}$ обычно находится в пределах:

$$\xi = \frac{l_0}{D_{\text{п}1}} = 0{,}4 \div 1{,}6, \text{ или в среднем } \xi = 1.$$

Однако при проектировании серии малых машин постоянного тока шкала мощностей их обычно строится на ограниченном числе диаметров якорей, причем для получения различных мощностей на каждом диаметре принимается две или три длины якоря. В этом случае отношение $l_0/D_{\text{п}1}$ может достигать значения, равного 2—2,4.

В управляемых исполнительных двигателях малой мощности для уменьшения момента инерции якоря указанное отношение обычно принимается $\xi = 1{,}4 \div 2{,}4$, или в среднем $\xi = 1{,}8$.

Если по техническим требованиям задания требуется обеспечить определенную кратность наибольшего пускового момента электродвигателя по отношению к номинальному, то, согласно уравнениям (1-12) или (1-13) и (1-16) позиции 67, диаметр якоря должен быть ограниченным, следовательно, $\xi \gg 1$.

Внутренний диаметр (расточка) полюсов и расчетная длина пакета якоря будут:

$$D_{\text{п}1} = \sqrt[3]{\frac{CP_\text{в}}{\xi n}}, \text{ см; } l_0 = \xi D_{\text{п}1}, \text{ см},$$

где n берется по заданию, P_a — из позиции 1, C — из позиции 3.

Действительная длина якоря в малых двигателях и генераторах может быть принята равной расчетной длине якоря, так как в пакете якоря отсутствуют вентиляционные каналы.

Расчетные значения внутреннего диаметра полюсов $D_{п1}$ и длины пакета якоря l_0 обычно округляются до ближайших стандартных чисел согласно ГОСТ 6636—69 (приложение VIII), при этом окончательный диаметр якоря $D_{н2} = D_{п1} - 2\delta$, где δ — длина воздушного зазора между внутренней поверхностью наконечников полюсов и якорем по позиции 33 (гл. 1).

5. Окружная скорость вращения якоря

$$v_2 = \frac{\pi D_{н2} n}{60} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с},$$

где n берется по заданию, $D_{н2}$ — из позиции 4.

Окружная скорость якоря малых двигателей и генераторов постоянного тока при 5000—8000 об/мин может достигать 20—25 м/с, а иногда и выше.

6. Полюсный шаг и расчетная полюсная дуга

$$\tau_2 = \frac{\pi D_{н2}}{2p}, \quad b_0 = \alpha \tau_2, \text{ см},$$

где $2p$ — число полюсов машины; в малых электродвигателях и генераторах оно равно 2 при мощностях до 150—200 Вт и 4 — свыше 200 Вт; в настоящее время в двигателях специального назначения число полюсов $2p = 4$ берется также и при мощностях в несколько ватт для повышения надежности работы щеткодержателей за счет параллельной работы двух одноименных щеток; α берется из позиции 3; $D_{н2}$ — из позиции 4.

Следует отметить, что длина расчетной полюсной дуги b_0 малых машин вследствие насыщения тонких полюсных наконечников обычно на 2—3% меньше длины действительной полюсной дуги b, поэтому

$$b = (1{,}02 \div 1{,}03)\, b_0.$$

7. Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{pn}{60}, \text{ Гц}.$$

1-3. ОБМОТКА ЯКОРЯ

В электродвигателях и генераторах постоянного тока малой мощности при двухполюсном исполнении применяется простая петлевая обмотка, а при четырехполюсном — простая волновая обмотка якоря.

Намотка этой обмотки на якорь может производиться или вручную — путем обматывания якоря непрерывной проволокой с выпуском отпаек (петель) к коллектору, или же на станке, когда от-

дельные секции обмотки изготовляются на нем и затем укладываются в пазы якоря. После укладки обмотки в пазы и припайки соответствующих концов ее к коллекторным пластинам она вместе с якорем пропитывается изолирующим лаком и просушивается. Затем производится динамическая балансировка якоря.

Вылет лобовой части обмотки по оси вала обычно составляет

$$l'_л \approx (0{,}3 \div 0{,}5) D_{н2},$$

где $D_{н2}$ берется из позиции 4.

8. Полезное магнитное поле полюса в воздушном зазоре при нагрузке машины

$$\Phi_\delta = B_\delta b_0 l_0 \cdot 10^{-4}, \text{ Вб},$$

где B_δ берется из позиции 3, l_0 — из позиции 4, b_0 — из позиции 6.

9. Число проводников обмотки якоря

$$N_2 = \frac{60aE}{pn\Phi_\delta},$$

где $a = 1$; n берется по заданию, E — из позиции 2, p — из позиции 6, Φ_δ — из позиции 8.

В случае двухколлекторного генератора число проводников якоря определяется отдельно для обмоток низшего и высшего напряжения.

10. Число пазов якоря

При выборе числа пазов якоря в электродвигателях и генераторах малой мощности необходимо учитывать то, что слишком малое число их в генераторах может явиться одной из причин заметных колебаний напряжения на коллекторе, а большое число пазов может привести к значительному уменьшению ширины зубца.

В радиогенераторах и тахогенераторах для уменьшения амплитуды и повышения частоты зубцовых пульсаций напряжения на коллекторе число пазов якоря обычно выбирается возможно большим и нечетным.

Вообще для уменьшения зубцовых пульсаций напряжения на коллекторе и ослабления явления «прилипания» якоря к полюсным наконечникам число пазов якоря у малых машин целесообразно выбирать нечетным. Кроме того, для дополнительного ослабления этих явлений эффективным средством может служить применение скоса пазов якоря или полюсных наконечников на одно пазовое деление или менее. Однако при применении скоса пазов якоря следует иметь в виду, что в этом случае происходит некоторое уменьшение площади паза и увеличение ширины коммутационной зоны. Это может вызвать, с одной стороны, определенные затруднения при укладке обмотки в пазы из-за недостатка места в них, а с дру-

гой — некоторое ухудшение условий коммутации тока в коммутирующих секциях якоря вследствие большего влияния на них поля полюсов.

Для уменьшения этих затруднений вместо скоса пазов якоря при необходимости может быть применен скос краев полюсных наконечников. Решение вопроса о необходимости применения скоса пазов якоря или полюсных наконечников в проектируемой машине в основном зависит от ее назначения и характера специальных требований, предъявляемых к ней.

Выбор числа пазов якоря (по опыту построенных электродвигателей и генераторов малой мощности) можно производить по следующему приближенному соотношению:

$$z_2 \approx (3 \div 4) D_{н2},$$

с округлением до ближайшего целого нечетного числа, где $D_{н2}$ берется из позиции 4.

11. Число коллекторных пластин

В машинах малой мощности число коллекторных пластин принимается:

$$K = (1 \div 3) z_2;$$

при этом обычно

$$K = 2z_2 \text{ при } 2p = 2;$$

$$K = z_2 \text{ или } 3z_2 \text{ при } 2p = 4,$$

так как в последнем случае применяется простая волновая обмотка якоря, которая выполняется симметричной только при нечетном числе коллекторных пластин; здесь z_2 берется из позиции 10

12. Число витков в секции обмотки якоря

$$w'_{c2} = \frac{N_2}{2K},$$

где N_2 — берется из позиции 9, K — из позиции 11.

В настоящей позиции принимается окончательное значение N_2, определяющее целое w'_{c2}.

В случае двухколлекторного генератора число витков в секции определяется отдельно для обмоток низшего и высшего напряжения.

13. Число проводников в пазу якоря

$$N_{п2} = \frac{N_2}{z_2} = 2w'_{c2}\frac{K}{z_2},$$

где z_2 берется из позиции 10, K — из позиции 11, w'_{c2} — из позиции 12.

В двухколлекторном генераторе число проводников в пазу определяется для каждой обмотки якоря в отдельности.

14. Шаги обмотки якоря по секциям и коллектору

Для простой петлевой обмотки якоря

$$y_1=\frac{K}{2p}\mp\varepsilon;\ y_2=y_1-1;\ y-1;\ y_к=1.$$

Для простой волновой обмотки

$$y=\frac{K-1}{p};\ y_к=y;$$

$$а)\ y_1=y_2=\frac{y}{2},\ \text{если } y\text{—четное число;}$$

$$б)\ y_1=\frac{y+1}{2};\ y_2=\frac{y-1}{2},\ \text{если } y\text{—нечетное число.}$$

Шаг этих же обмоток по пазам

$$y_п=\frac{z_2}{2p}\mp\varepsilon,$$

где ε - нуль или правильная дробь, делающая y_1 или $y_п$ целым числом; $2p$ берется из позиции 6; K — из позиции 11.

После этого составляется таблица обмотки и вычерчивается ее схема.

15. Линейная нагрузка якоря

$$A_2=\frac{N_2I_2}{2\pi D_{я2}},\ \text{А/см},$$

где I_2 берется из позиции 2; N_2 — окончательное значение из позиции 12.

Полученная здесь величина A_2 не должна отличаться от предварительно принятой в позиции 3 более чем на $\pm$ 5%.

В двухколлекторном генераторе линейная нагрузка определяется для каждой обмотки якоря в отдельности.

1-4. РАЗМЕРЫ ЗУБЦОВ, ПАЗОВ И ПРОВОДОВ ОБМОТКИ ЯКОРЯ

В машинах постоянного тока малой мощности применяются почти исключительно полузакрытые пазы якоря круглой, овальной, трапецеидальной и прямоугольной формы.

На рис. 1.3 представлены наиболее употребительные формы пазов якоря этих машин. Круглая форма пазов упрощает и удешевляет изготовление штампа для якоря, что снижает стоимость изготовления машины.

В радиогенераторах и тахогенераторах в целях уменьшения зубцовых пульсаций напряжения на коллекторе применяется скос пазов якоря на одно пазовое деление.

Обмотка якорей электродвигателей и генераторов постоянного тока малой мощности выполняется преимущественно из круглого медного обмоточного провода с изоляцией марок ПЭЛ, ПЭТ, ПЭФ-2, ПЭВ-2, ПЭТВ, ПЭЛШО и ПЭЛШКО, а иногда марки ПБД. Лишь в относительно мощных машинах низкого напряжения приходится прибегать к шинной обмотке якоря, применяя для этой цели полузакрытые пазы прямоугольной формы (рис. 1.3, *в*).

Размеры и марка изоляции обмоточных проводов определяются государственными общесоюзными стандартами (ГОСТ) и ведомственными техническими условиями. Так, перечисленные марки проводов расшифровываются следующим образом:

ГОСТ 2773—51 (приложение I):

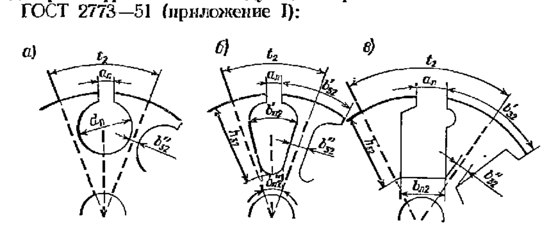


Рис. 1.3. Формы пазов якоря малых машин: *а* — круглый паз; *б* — трапецеидальный; *в* — прямоугольный

ПЭЛ — провод эмалированный лакостойкий;

ПЭТ — провод эмалированный лакостойкий с повышенной теплостойкостью.

ГОСТ 7262- 54 (приложение I):

ПЭВ-2 — провод, изолированный высокопрочной эмалью в два слоя.

ГОСТ 6324- 52 (приложение I):

ПЭЛШО — провод, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из натурального шелка;

ПЭЛШКО — провод, изолированный лакостойкой эмалью и одним слоем обмотки из капрона;

ПБД — провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной пряжи;

Ведомственные технические условия:

МРТУ 2-43-12—61 (приложение I):

ПЭТВ — провод эмалированный лакостойкий с высокой теплостойкостью.

МИО-003—63 (приложение I):

ПЭФ-2 — провод, изолированный фторопластовой эмалью в два слоя.

ГОСТ 7019—60 (приложение I):

ПЭТКСОТ — провод эмалированный теплостойкий со стекловолокном в один слой.

Провода марок ПЭТВ, ПЭФ-2 и ПЭТКСОТ принадлежат к категории теплостойких обмоточных проводов, допускающих длительно температуру нагрева до 180—200° С. Эти провода применяются в теплостойких малогабаритных электрических машинах специального назначения.

Провода марок ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ-2 обеспечивают высокий коэффициент заполнения паза, но не всегда достаточно надежны в отношении изоляции, в особенности при относительно высоких напряжениях машины. Провода марок ПЭЛШО и ПЭЛШКО дают достаточно высокий коэффициент заполнения паза и надежны в отношении изоляции. При напряжениях машины 6—12 В можно ограничиться проводами марок ПЭЛ и ПЭТ, при напряжениях 12—30 В — проводами марок ПЭЛ, ПЭТ, ПЭВ-2 и при напряжениях 110 В и выше — проводами марок ПЭЛШО, ПЭЛШКО или ПБД.

16. Предварительный выбор плотности тока в обмотке якоря

В электродвигателях и генераторах постоянного тока малой мощности допустимая плотность тока в обмотке якоря выбирается в зависимости от режима работы, типа исполнения и условий охлаждения и применения машины. Как известно, тепловой режим машины постоянного тока в основном определяется величиной произведения линейной нагрузки якоря на плотность тока в обмотке его $A_2 j_2$ и условиями теплоотдачи.

При допустимой плотности тока в обмотке якоря j_2 для данного режима работы машины наибольшее превышение температуры якоря над температурой окружающей среды не будет превосходить допустимого значения. Для установления условий выбора этой плотности тока при различных режимах работы можно воспользоваться известными из теории кривыми нагревания во времени якоря машины при продолжительном, повторно-кратковременном и кратковременном режимах работы ее. При этом характер повторно-кратковременного режима определяется заданным графиком работы.

На рис. 1.4 для примера представлены графики повторно-кратковременного режима работы для малых электродвигателей постоянного тока некоторых механизмов. Как известно, повторно-кратковременный режим работы электродвигателя во времени характеризуется определенным циклом $t_ц$, состоящим из рабочего периода $t_р$ и времени остановки или перерыва $t_п$, так что цикл

$$t_ц = t_р + t_п.$$

Число таких циклов работы малых электродвигателей обычно ограничено и задается условиями работы механизма. Оно может составлять от 3 до 10 при продолжительности цикла:

$$t_ц = t_р + t_п = 1 + 9 = 10 \text{ мин} \quad \text{и} \quad t_ц = 5 + 5 = 10 \text{ с (рис. 1.4).}$$

После указанного числа циклов работы электродвигатель останавливается до прихода в практически холодное состояние.

Каждый цикл повторно-кратковременного режима работы электродвигателя характеризуется так называемой продолжительностью включения, обозначаемой условно *ПВ*. Так, в приведенном примере эта продолжительность включения будет:

$$ПВ_{\%}=\frac{t_р}{t_р+t_п}100=\frac{1}{1+9}100=10\%;$$

$$ПВ_{\%}=\frac{t_р}{t_р+t_п}100=\frac{5}{5+5}100=50\%.$$

Кратковременный режим работы электродвигателя во времени характеризуется определенным рабочим периодом $t_р$, после чего двигатель останавливается до прихода в практически холодное состояние, т. е. время перерыва работы $t_п = \infty$ (рис. 1.7).

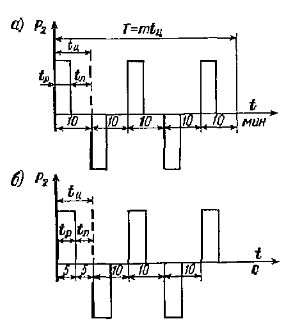


Рис. 1.4. Примеры повторно-кратковременного режима работы с реверсированием малых двигателей постоянного тока: *а* — при $ПВ_{\%} = 10\%$; *б* — при $ПВ_{\%} = 50\%$

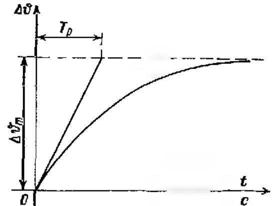


Рис. 1.5. Кривая нагревания якоря электродвигателя продолжительного режима работы

На рис. 1.5 представлена кривая нагревания якоря электродвигателя продолжительного режима, на рис. 1.6 — аналогичная кривая двигателя повторно-кратковременного режима и на рис. 1.7 — то же двигателя кратковременного режима работы.

В первом случае — при продолжительном режиме работы электродвигателя — превышение температуры якоря его над температурой окружающей среды достигает своего предельного допустимого установившегося значения $\Delta\vartheta_m$ в течение продолжительного времени.

Во втором случае — при повторно-кратковременном режиме — превышение температуры якоря достигает предельного допустимого значения $\Delta\vartheta_m$ в течение заданного числа циклов *m*, после чего дви-

гатель должен останавливаться (рис. 1.6). После прихода его в практически холодное состояние он может быть снова пущен в ход и работать с тем же числом циклов.

Рис. 1.6. Кривая нагревания якоря электродвигателя повторно-кратковременного режима работы при заданном числе циклов m

1 — нагревание вращающейся машины; *2* — охлаждение неподвижной машины

Наконец, в третьем случае — при кратковременном режиме работы — предельное превышение температуры якоря $\Delta\vartheta_m$ достигается через промежуток рабочего времени $t_р$ (рис. 1.7), после чего двигатель должен останавливаться.

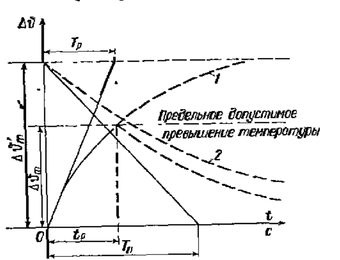


Рис. 1.7. Кривая нагревания якоря электродвигателя кратковременного режима работы за время $t_р$

1 — нагревание вращающейся машины; *2* — охлаждение неподвижной машины

Если воспользоваться кривыми рис. 1.5 — 1.7 и известными уравнениями теории нагревания и охлаждения электрических машин,[1] то для удельной

[1] Костенко М. П. Электрические машины. Специальная часть. М.—Л., 1949, с. 581—586.

тепловой загрузки поверхности якоря можно получить следующие соотношения:

при продолжительном режиме работы машины

$$q = \alpha' \Delta\vartheta_m (1 + 0{,}1v), \text{ Вт/см}^2; \quad (1\text{-}1а)$$

при повторно-кратковременном режиме

$$q = \frac{\alpha' \Delta\vartheta_m (1 + 0{,}1v)}{f\left(\frac{t_р}{T_р}\right) \psi\left(\frac{t_р}{T_р}\right)}, \text{ Вт/см}^2; \quad (1\text{-}1б)$$

при кратковременном режиме

$$q = \frac{\alpha' \Delta\vartheta_m (1 + 0{,}1v)}{f\left(\frac{t_р}{T_р}\right)}, \text{ Вт/см}^2, \quad (1\text{-}1в)$$

где $\Delta\vartheta_m$ — предельное допустимое превышение температуры якоря над температурой окружающей среды, которое для обычных малых машин по ГОСТ 183—66 составляет $\Delta\vartheta_m = 65°$ С; для машин специального назначения это превышение температуры допускается более высоким; $v = v_2$ — окружная скорость якоря, м/с — в машинах без встроенного вентилятора, или результирующая скорость течения охлаждающего воздуха относительно поверхности якоря — в машинах с встроенным вентилятором, равная

$$v = \sqrt{v_2^2 + v'^2}, \text{ м/с} \quad (1\text{-}2)$$

при этом

$$v' = (0{,}4 \div 0{,}5) v_в, \text{ м/с}; \quad v_в = \frac{\pi D_в n}{60} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с}, \quad (1\text{-}3)$$

где $D_в \approx D_{н2} (1 + 2\lambda'')$ — диаметр колеса центробежного вентилятора, $\lambda'' = h_л/D_{н2} = 0{,}25 \div 0{,}40$; n — скорость вращения якоря об/мин;

$$f\left(\frac{t_р}{T_р}\right) = \left(1 - e^{-\frac{t_р}{T_р}}\right); \quad (1\text{-}4)$$

$$\psi\left(\frac{t_р}{T_р}\right) = \left[1 + e^{-a_1 \frac{t_р}{T_р}} + e^{-2a_1 \frac{t_р}{T_р}} + \ldots + e^{-(m-1) a_1 \frac{t_р}{T_р}}\right],$$

при этом $t_р$ — рабочий период, с (рис. 1.6 и 1.7); $T_р \approx \frac{0{,}9 D_{н2}}{\alpha' (1 + 0{,}1v)}$ — постоянная времени нагревания вращающегося якоря, с; $a_1 = \left(1 + \frac{T_р}{T_п} \cdot \frac{t_п}{t_р}\right)$; m — число циклов; $T_п \approx \frac{0{,}9 D_{н2}}{\alpha'}$ — постоянная времени охлаждения неподвижного якоря, с; $D_{н2}$ — диаметр якоря, см; α' — коэффициент теплоотдачи поверхности якоря в спокойной среде, который в малых машинах постоянного тока по опытным

данным при нормальном давлении воздуха 0,101 МН/м² (760 мм рт. ст.) в среднем имеет следующие значения: $\alpha'_0 = 0{,}0014 \div 0{,}0018$ Вт/(см²·град) при закрытом исполнении машины без вентилятора, $\alpha'_{в0} = 0{,}0036 \div 0{,}0044$ Вт/(см²·град) — при защищенном исполнении машины с встроенным вентилятором.

В машинах постоянного тока малой мощности, применяемых в авиации, коэффициент теплоотдачи поверхности якоря α' уменьшается с увеличением высоты полета самолета. Значение этого коэффициента, например, для закрытых невентилируемых электродвигателей в зависимости от высоты можно приближенно определить по следующей эмпирической формуле, полученной по опытным данным теплового испытания электродвигателей постоянного тока малой мощности в термобарокамере при разряженности воздуха, соответствующей данной высоте:

$$\alpha' = \frac{\alpha'_0}{1 + 0{,}06H}, \text{ Вт/(см}^2\cdot\text{град)}, \qquad (1\text{-}5)$$

где H — высота над уровнем моря, км.

В случае защищенных электродвигателей с встроенным центробежным вентилятором значение коэффициента теплоотдачи поверхности якоря в зависимости от высоты можно приближенно определить эмпирической формулой, полученной по опытным данным:

$$\alpha'_{в} = \frac{\alpha'_{в0}}{1 + 0{,}2H}, \text{ Вт/(см}^2\cdot\text{град)}. \qquad (1\text{-}6)$$

Произведение $\alpha'\Delta\vartheta_m$ в уравнениях (1-1а) — (1-1в) при неподвижном якоре и $H = 0$ можно в среднем положить: в случае закрытого исполнения машины без вентилятора:

$$\alpha'\Delta\vartheta_m \approx 0{,}12 \text{ Вт/см}^2 \text{ при } \Delta\vartheta_m = 65^\circ\text{C};$$

$$\alpha'\Delta\vartheta_m \approx 0{,}15 \text{ Вт/см}^2 \text{ при } \Delta\vartheta_m = 90^\circ\text{C};$$

и в случае защищенного исполнения машины с вентилятором:

$$\alpha'\Delta\vartheta_m \approx 0{,}26 \text{ Вт/см}^2 \text{ при } \Delta\vartheta_m = 65^\circ\text{C};$$

$$\alpha'\Delta\vartheta_m \approx 0{,}36 \text{ Вт/см}^2 \text{ при } \Delta\vartheta_m = 90^\circ\text{C}.$$

Удельная тепловая загрузка q поверхности по уравнениям (1-1а) — (1-1в) представляет собой отношение общих потерь в обмотке и стали якоря и потерь от трения его о воздух к наружной цилиндрической поверхности пакета якоря.

Если учесть предельные превышения температуры якоря по нормам, то среднюю допустимую плотность тока в обмотке якоря обычных малых машин можно определить по следующим соотношениям [12]:

при $2p=2$

до 5000 об/мин $j_2' = \frac{1700q}{A_2}$, А/мм²;

от 5000 до 10 000 об/мин $j_2' = \frac{1400q}{A_2}$, А/мм²; (1-7а)

от 10 000 до 15 000 об/мин $j_2' = \frac{1200q}{A_2}$, А/мм²;

при $2p=4$

до 5000 об/мин $j_2' = \frac{1300q}{A_2}$, А/мм²;

от 5000 до 10 000 об/мин $j_2' = \frac{1100q}{A_2}$, А/мм²; (1-7б)

от 10 000 до 15 000 об/мин $j_2' = \frac{1000q}{A_2}$, А/мм².

Здесь удельная тепловая загрузка якоря q определяется по уравнениям (1-1а) — (1-1в) в зависимости от режима работы машины.

Отклонения от среднего значения допустимой плотности тока j_2', полученного по уравнениям (1-7а) и 1-7б), при окончательном выборе сечения провода обмотки якоря могут составлять $\pm$ 15%.

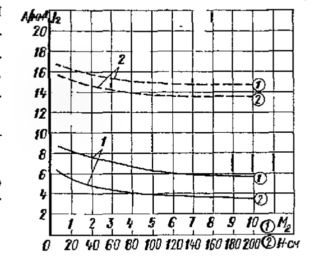


Рис. 1.8. Кривые допустимых плотностей тока в обмотке якоря двухполюсных малых машин постоянного тока закрытого исполнения в зависимости от вращающего момента при разных режимах работы

1 — продолжительный режим; *2* — кратковременный режим до 5 мин

Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря двухполюсных малых электродвигателей закрытого исполнения можно выбирать также по кривым рис. 1.8 в зависимости от полезного вращающего момента при разных их режимах работы.

Вращающий момент малого электродвигателя определяется по уравнению

$$M_2 = 955 \frac{P_2}{n}, \text{ Н·см},$$

где P_2 и n — номинальные значения мощности и скорости вращения электродвигателя по заданию.

17. Сечение и диаметр провода обмотки якоря

Предварительно

$$q_2' = \frac{I_2}{2j_2'}, \text{ мм}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2, j_2' — из позиции 16.

Сечение и диаметр провода окончательно выбираются по ближайшим данным ГОСТ из приложения I:

$$q_2 = \ldots, \; d_2/d_{2и} = \ldots$$

В двухколлекторном генераторе сечение и диаметр провода определяются отдельно для каждой обмотки якоря.

18. Окончательная плотность тока в проводнике обмотки якоря

$$j_2 = \frac{I_2}{2q_2}, \text{ А/мм}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2, q_2 — из позиции 17.

19. Площадь сечения паза якоря

а. Площадь, занимаемая изолированными проводниками

$$Q_{п.п} = \frac{N_{п2} \cdot d_{2и}^2}{f_0}, \text{ мм}^2,$$

где $N_{п2}$ берется из позиции 13, $d_{2и}$ — из позиции 17; $f_0 = 0{,}70 \div 0{,}74$ — технологический коэффициент, учитывающий неточности и неплотности укладки проводников в пазы.

В двухколлекторном генераторе площадь сечения паза определяется с учетом числа проводников в пазу двух обмоток.

б. Площадь, занимаемая пазовой изоляцией

$$Q_{п.и} \approx \delta_и П, \text{ мм}^2,$$

где $\delta_и = 0{,}10 \div 1{,}0$ *мм* — толщина пазовой изоляции из кабельной бумаги, лакированной ткани или электрокартона, выбираемая в зависимости от напряжения машины:

$\delta_и = 0{,}10 \div 0{,}15$ мм	при напряжении		6—12 В;
$\delta_и = 0{,}15 \div 0{,}25$ мм	»	»	12—30 В;
$\delta_и = 0{,}30 \div 0{,}50$ мм	»	»	110—220 В.

В высоковольтных радиогенераторах напряжением 750—1500 В $\delta_и = 0{,}8 \div 1{,}0$ мм; периметр паза $П = (0{,}6 \div 0{,}8)\, D_{н2}$, где $D_{н2}$ берется из позиции 4.

в. Площадь, занимаемая клином

$$Q_{п. к} = b_{кл} h_{кл}, \text{ мм}^2,$$

где можно принять ширину клина по дуге окружности якоря $b_{кл} = 3 \div 6$ мм и высоту его $h_{кл} = 0,5 \div 1,0$ мм.

г. Общая требуемая площадь паза якоря

$$Q_п = Q_{п. в} + Q_{п. и} + Q_{п. к}, \text{ мм}^2.$$

20. Коэффициент заполнения паза

В практике расчета машин малой мощности пользуются обычно понятием коэффициента заполнения паза изолированным проводом в виде отношения

$$k_{п. и} = \frac{N_{п2} q_{2и}}{Q_п},$$

где $q_{2и}^2 = \pi d_{2и}^2/4$ — площадь поперечного сечения провода с изоляцией, мм^2; $N_{п2}$ берется из позиции 13, $d_{2и}$ — из позиции 17, $Q_п$ — из позиции 19.

Величина коэффициента $k_{п. и}$ составляет $0,30 \div 0,48$.

21. Размеры паза и зубцов якоря

а. В случае круглой формы диаметр паза якоря (рис. 1.3,*а*)

$$d_п = \sqrt{\frac{4Q_п}{\pi}} = 1,13\sqrt{Q_п}, \text{ мм}.$$

Если в машине предусматривается скос пазов якоря на одно пазовое деление, то для сохранения требуемой площади паза диаметр его должен быть:

$$d'_п = \frac{d_п}{\sqrt{\cos\gamma}},$$

где косинус угла скоса пазов

$$\cos\gamma = \frac{l_0}{\sqrt{t_2^2 + l_0^2}};$$

при этом t_2 — зубцовый шаг по окружности якоря, l_0 берется из позиции 4, $Q_п$ — из позиции 19.

б. В случае овальной или трапецеидальной формы паза с одинаковой толщиной зубца по его высоте (рис. 1.3, *б*) для определения ширины и высоты паза удобнее сначала выбрать минимальную толщину зубца $b''_{з2}$, исходя из максимальной допустимой индукции в нем. При этом по соображениям механической прочности толщина зубца не должна быть менее 1 мм.

Затем вычерчивается в масштабе 2 : 1 или более крупном часть окружности якоря с зубцовым шагом и наносится толщина $b''_{з2}$ относительно осей двух соседних зубцов (рис. 1.9). После этого выбирается соответствующая высота паза $h_{п2}$, исходя из требуемой площади его $Q_п$. При скошенных пазах потребная площадь паза должна быть $Q_п/\cos\gamma$.

При выборе $h_{п2}$ следует иметь в виду необходимую высоту сердечника якоря в отношении допустимой индукции и механической прочности. Вообще, согласно опыту построенных машин малой мощности, высота паза якоря обычно составляет

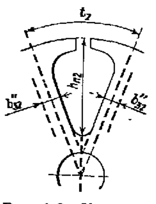


Рис. 1.9. К определению размеров паза якоря

$$h_{п2} \approx (0{,}25 \div 0{,}35)\, D_{н2}.$$

в. В случае прямоугольного паза и трапецеидальных зубцов (рис. 1.3, в) высота паза $h_{п2}$ ориентировочно выбирается из предыдущего выражения, а ширина паза будет

$$b_{п2} = \frac{Q_п}{h_{п2}} \quad \text{или} \quad b_{п2} = \frac{Q_п}{h_{п2}\cos\gamma}.$$

Ширина прорези паза (рис. 1.3) принимается

$$a_п \approx (2 \div 8)\, d_{2и},$$

где большие значения коэффициента перед $d_{2и}$ относятся к более тонким проводам.

Зубцовые шаги по вершинам, серединам и основаниям зубцов якоря:

$$t_2 = \frac{\pi D_{н2}}{z_2};$$

$$t_{ср} = \frac{\pi (D_{н2} - h_{п2})}{z_2};$$

$$t'_2 = \frac{\pi (D_{н2} - 2h_{п2})}{z_2},$$

где в случае круглых пазов $h_{п2} = d_п + 0{,}5$ мм.

Размеры зубца:

круглый паз (рис. 1.3, а)

$$b'_{з2} = t_2 - d_п;$$

$$b''_{з2} = t_{ср} - d_п;$$

$$b_{з2} = t'_2;$$

овальный или трапецеидальный паз (рис. 1.3, б)

$$b'_{з2} = t_2 - a_п; \quad b''_{з2} \text{— согласно рис. 1.9;}$$

прямоугольный паз (рис. 1.3, *в*)

$$b'_{з2} = t_2 - a_п;$$

$$b_{ср} = t_{ср} - b_{п2};$$

$$b''_{з2} = t'_2 - b_{п2},$$

где $D_{н2}$ берется из позиции 4, z_2 — из позиции 10.

Проверка максимальной индукции в минимальном сечении зубца:

$$B_{з2\,макс} = \frac{B_\delta t_2}{0{,}93 b''_{з2}}, \text{ Т},$$

где B_δ берется из позиции 3; 0,93 — коэффициент, учитывающий лаковую изоляцию между листами пакета якоря.

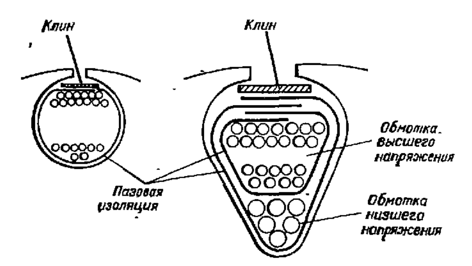


Рис. 1.10. Укладка проводов обмотки якоря в пазы

Максимальная индукция $B_{з2\,макс}$ в зубцах якоря малых электродвигателей и генераторов постоянного тока по технологическим условиям обычно получается в пределах 1,3 — 1,5 Т — при продолжительном режиме и 1,5 — 1,7 Т — при кратковремениом режиме работы. В отдельных случаях возможно некоторое превышение этих значений.

Эскизы пазов якоря с укладкой обмотки даны на рис. 1.10.

22. Средняя длина одного проводника обмотки якоря

При $2p=2$ $\quad l_{ср2} \approx l_0 + 1{,}2D_{н2}$, см;

при $2p=4$ $\quad l_{ср2} \approx l_0 + 0{,}8D_{н2}$, см,

где $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4.

23. Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии

$$r_2 = k_\vartheta \frac{N_2 l_{ср\,2}}{5700 \cdot 4 q_2}, \ Ом,$$

где N_2 берется из позиции 12, q_2 — из позиции 17, $l_{ср\,2}$ — из позиции 22; $k_\vartheta = 1 + 0{,}004\ (\vartheta - 20)$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки при нагревании ее от 20 до ϑ° С.

24. Падение напряжения в обмотке якоря при полной нагрузке

$$\Delta U_2 = I_2 r_2, \ В,$$

где I_2 — берется из позиции 2, r_2 — из позиции 23.

Падение напряжения в обмотке якоря электродвигателей и генераторов малой мощности составляет примерно 10—20% номинального напряжения машины в зависимости от величины этого напряжения и режима работы машины. Меньшие значения падения напряжения относятся к машинам продолжительного режима работы и напряжением 110 В и выше.

В случае двухколлекторного генератора сопротивления и падения напряжения определяются для каждой обмотки якоря в отдельности.

1-5. КОЛЛЕКТОР, ЩЕТКОДЕРЖАТЕЛИ И ЩЕТКИ

В конструктивном, производственном и эксплуатационном отношениях коллектор представляет собой наиболее ответственную часть машины. Коллекторные пластины в электродвигателях и генераторах малой мощности изготовляются из твердотянутой меди и изолируются друг от друга миканитом или пластмассой, а от корпуса машины — миканитом или изолирующей пластмассой.

В целях устранения механических причин искрения коллектор должен иметь строго цилиндрическую и гладкую поверхность, конструкция щеткодержателя должна обеспечивать правильное положение и работу щеток на коллекторе.

Конструкции коллекторов электродвигателей и генераторов постоянного тока малой мощности представлены на рис. 1.11.

Толщина тела малого коллектора обычно составляет

$$\delta'_к \approx (0{,}1 \div 0{,}2)\, D_к.$$

Щеткодержатели в рассматриваемых малых электродвигателях и генераторах применяются трубчатого и коробчатого типов. В них щетка расположена перпендикулярно к коллектору и давление пружины на нее действует непосредственно в радиальном направлении. В трубчатых щеткодержателях это давление осуществляется с помощью винтовой пружины, а в коробчатых — спиральной.

В высокоскоростных машинах малой мощности при скоростях вращения порядка 10 000 об/мин и выше заметно усиливаются механические вибрации щеток на коллекторе под влиянием биения

его из-за наличия некоторого эксцентриситета, нецилиндричности поверхности и других механических факторов. Вследствие этого происходит усиление искрения под щетками. Как показывает опыт,

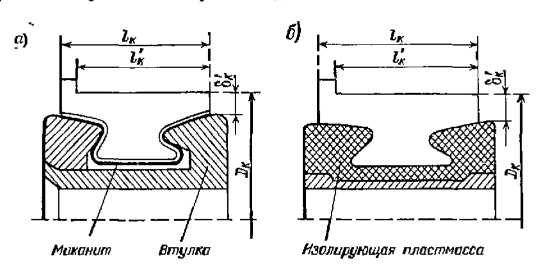


Рис. 1.11. Коллекторы малых машин: *а* — развальцованный коллектор; *б* — коллектор с втулкой из пластмассы

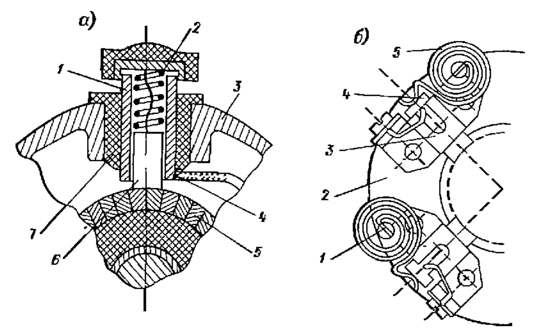


Рис. 1.12. Щеткодержатели малых машин: *а* — трубчатый *б* — коробчатый

1 — металлическая втулка; *2* — пружина; *3* — подшипниковый щит; *4* — зажим; *5* — коллектор; *6* — щетка; *7* — изолирующая втулка; *1* — палец пружины; *2* — траверса; *3* — обойма; *4* — щетка; *5* — пружина

для уменьшения вибраций щеток в этом случае целесообразно применять так называемые реактивные щеткодержатели, в которых щетки располагаются под некоторым углом к поверхности коллектора в направлении вращения последнего.

Втулки трубчатых и обоймы коробчатых щеткодержателей выполняются прямоугольной формы. На рис. 1.12 представлены по

одному из типов трубчатого и коробчатого щеткодержателей машин малой мощности. Длина щетки во втулке или обойме берется в пределах 1,5 — 2 ширины щетки по оси коллектора. Щетка выступает из втулки или обоймы на 1—2 мм.

25. Предварительный диаметр коллектора

Диаметр коллектора $D'_к$ предварительно выбирается из соотношения

$$D'_к \approx (0,5 \div 0,9)\, D_{н2},\ \text{см},$$

где $D_{н2}$ берется из позиции 4.

26. Ширина коллекторной пластины

Коллекторное деление

$$t'_к = \frac{\pi D'_к}{K},$$

где K берется из позиции 11, $D'_к$ — из позиции 25; в машинах малой мощности ширина коллекторных пластин обычно $\beta_к = 0,2 \div 0,5$ см.

Толщина миканитовой или пластмассовой изоляции между коллекторными пластинами в зависимости от напряжения составляет:

$\beta_и = 0,4 \div 0,6$ мм при напряжении до 30 В;
$\beta_и = 0,6 \div 0,8$ мм при напряжении 110 В и выше.

После выбора $\beta_к$ и $\beta_и$ окончательное коллекторное деление

$$t_к = \beta_к + \beta_и,\ \text{см}.$$

27. Окончательный диаметр коллектора и его окружная скорость

Диаметр коллектора

$$D_к = \frac{K t_к}{\pi},\ \text{см}.$$

Окружная скорость коллектора

$$v_к = \frac{\pi D_к n}{60} \cdot 10^{-2},\ \text{м/с},$$

где n берется по заданию, K — из позиции 11, $t_к$ — из позиции 26. Окружная скорость коллектора составляет $0,5 \div 0,9$ величины окружной скорости якоря, указанной в позиции 5.

28. Сорт щеток и плотность тока под щетками

В низковольтных электродвигателях постоянного тока малой мощности применяются преимущественно медно-графитные щетки марок М-1, М-6 и МГ. В высоковольтных электродвигателях

Таблица 1.1

Группа щеток	Марка щеток	Допустимая плотность тока $j_{щ}$, А/см²	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе и окружной скорости 15 м/с $\Delta U_{щ}$, В	Максимальная окружная скорость $v_к$, м/с	Коэффициент трения при $v = 15$ м/с не более	Удельное нажатие $p_{щ}$, Н/см²
Угольно-графитовые	Т-6	6	2±0,5	10	0,30	1,96 ÷ 2,35
	УГ-2	8	2±0,4	15	0,25	
Графитные	Г-1	7	2,2±0,5	12	0,30	1,96 ÷ 2,35
	Г-3	10	1,9±0,4	25	0,25	
	Г-8	11	1,9±0,4	25	0,25	
Электрографитные	ЭГ-2	10	2,7±0,6	25	0,20	1,96 ÷ 3,92
	ЭГ-8	10	2,4±0,5	40	0,25	
	ЭГ-14	10	2,5±0,5	40	0,75	
Медно-графитовые	М-1	15	1,5±0,5	25	0,25	1,47 ÷ 1,96
	М-3	12	1,8±0,4	20	0,25	
	М-6	15	1,5±0,5	25	0,20	
	МГ	20	0,2±0,1	20	0,20	1,96 ÷ 2,35
	МГ-4	15	1,1±0,5	20	0,20	
Бронзо-графитовые	БГ	20	0,3±0,1	20	0,25	1,68 ÷ 2,16

П р и м е ч а н и я. 1. В некоторых специальных электродвигателях и генераторах удельное нажатие щеток принимается равным 3,92 ÷ 5,87 Н/см².
2. 1Н/см² = 0,102 кг/см².

Ширина по окружности коллектора $b_{щ}$, мм	Длина по оси коллектора $a_{щ}$, мм	Высота $h_{щ}$, мм
1.0	1.6	6,3
1,6	2,0	5,0
		6,3
		8,0
		10,0
	2,5	6,3
2,0		8,0
		10,0
	3,2	6,3
		8,0
	4,0	10,0
2,5	3,2	8,0
		10,0
	4,0	8,0
		10,0
	5,0	12,5
	6,3	12,5
		16,0
	10,0	32,0
3,2	4,0	6,3
		8,0
		10,0
		12,5
		16,0
	5,0	10,0
		12,5
		16,0
	6,3	10,0
		12,5
		16,0
		20,0
4,0	5,0	12,5
	6,3	
	10,0	16,0
5,0	6,3	12,5
	8,0	16,0
		20,0
		25,0
6,3	10,0	16,0
		20,0
		25,0
		20,0
		25,0
		32,0
	12,5	20,0
		25,0
		32,0
8,0	10,0	20,0
		25,0
		32,0
	12,5	25,0
		32,0
	16,0	25,0
		32,0
	20,0	25,0
		32,0
10,0	12,5	25,0
	25,0	32,0
		40,0
		50,0
	40,0	40,0
		50,0

(110—220В) находят применение также и другие сорта щеток, кроме указанных, например графитные марок Г-3 и Г-8 и электрографитированные марок ЭГ-8 и ЭГ-14.

В радиогенераторах на низковольтном коллекторе применяются медно-графитные щетки марок М-1, М-3 и М-6, а на высоковольтном — электрографитированные щетки марок ЭГ-2 и ЭГ-14 и угольно-графитные марок Т-6 и УГ-2.

Физические свойства и плотности тока указанных сортов щеток, а также их номинальные размеры по ГОСТ 2332—63 и ГОСТ 12232—71 представлены соответственно в табл. 1.1 и 1.2.

29. Площадь сечения щетки и размеры ее

Площадь сечения

$$S_щ = \frac{I_2}{p j'_щ}, \text{ см}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2; $j'_щ$ — из позиции 28; p — число пар полюсов.

Размеры щетки

$$S_щ = a_щ b_щ,$$

где $b_щ = (1 \div 3)\ \beta_к$; $a_щ = \frac{S_щ}{b_щ}$, при этом $a_щ$ — длина щетки по оси коллектора; $b_щ$ — ширина щетки по дуге окружности коллектора.

Высота щетки

$$h_щ = (1{,}5 \div 2{,}0)\, a_щ.$$

30. Окончательная плотность тока под щетками

$$j_щ = \frac{I_2}{p a_щ b_щ}, \text{ А/см}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2, $a_щ$ и $b_щ$ — из позиции 29.

31. Длина коллектора

Активная длина коллектора по оси вала, см

$$l'_k = (1{,}5 \div 2{,}0)\ a_щ.$$

Полная длина коллектора по оси вала, см

$$l_к = l'_к + (3 \div 5)\, d_2,$$

где d_2 берется из позиции 17, $a_щ$ — из позиции 29.

Так как в рассматриваемых машинах постоянного тока малой мощности добавочные полюсы в коммутационной зоне отсутствуют и щетки на коллекторе обычно располагаются соответственно положению геометрической нейтрали, то процесс коммутации тока в короткозамкнутых секциях якоря получается замедленным из-за наличия в них реактивной э. д. с. $e_р$ и э. д. с. поля якоря $e_а$. Обе эти э. д. с. суммируются и вызывают в цепи короткозамкнутой секции добавочный ток, способствующий увеличению плотности тока на сбегающем крае щетки.

В момент размыкания цепи секции при наличии в ней указанных э. д. с. и тока между краем щетки и сбегающей коллекторной пластиной возникают небольшие электрические дуги в виде мелких искр. Интенсивность этих искр зависит от величины результирующей э. д. с. в короткозамкнутой секции $e = e_р + e_а$. Во избежание недопустимого искрения под щетками величина э. д. с. в секции не должна превышать определенного значения. Однако коммутация тока в секции может также ухудшиться вследствие влияния поля полюсов, если ширина коммутационной зоны будет близка к расстоянию между краями наконечников двух соседних полюсов.

Ширина коммутационной зоны

$$b_к = b'_щ + \left[u_к + \left|\frac{K}{2p} - y_1\right| - \frac{a}{p}\right] t'_к, \text{ см},$$

где $u_к = K/z_2$ — число секционных сторон в одном слое паза;

$$b'_щ = b_щ \frac{D_{н2}}{D_к}; \quad t'_к = t_к \frac{D_{н2}}{D_к}; \quad a = 1;$$

$D_{н2}$ берется из позиции 4; p — из позиции 6; z_2 — из позиции 10; K — из позиции 11; y_1 — из позиции 14; $t_к$ — из позиции 26; $D_к$ — из позиции 27; $b_щ$ — из позиции 29.

Для благоприятной коммутации необходимо соблюдать соотношение $b_к < 0{,}8\,(\tau_2 - b_0)$, где τ_2 и b_0 — берутся из позиции 6.

Удельная магнитная проводимость для полей рассеяния обмотки якоря при трапецеидальных пазах приближенно определяется по следующей формуле:

$$\lambda_2 = \left[0{,}6 \frac{2h_{п2}}{b'_{п2} + b''_{п2}} + \frac{l_{л2}}{l_0} + 0{,}92 \log\left(\frac{\pi l_2}{a_п}\right)\right] \cdot 10^{-8}, \quad \text{Вб/(А·см)},$$

где $l_{л2} = 1{,}2\,D_{н2}$ при $2p = 2$; $l_{л2} = 0{,}8\,D_{н2}$ при $2p = 4$; при этом в случае круглых пазов нужно положить

$$\frac{b'_{п2} + b''_{п2}}{2} = d_п.$$

и прямоугольных

$$\frac{b'_{п2} + b''_{п2}}{2} = b_{п2}.$$

Среднее значение реактивной э. д. с. в короткозамкнутой секции якоря

$$e_р = 2w'_{с2}\lambda_2 l_0 A_2 v_2 \cdot 10^2, \text{ В}.$$

Как указывалось, в короткозамкнутой секции якоря, помимо реактивной э. д. с., индуктируется еще э. д. с. поля якоря. Эта э. д. с. может быть определена по следующей формуле [5]:

$$e_a = \frac{0,4\pi w'_{с2} A_2 \tau_2 l_0 v_2 \cdot 10^{-6}}{\delta_0}, \text{ В}.$$

Среднее значение результирующей э. д. с. в короткозамкнутой секции якоря

$$e = e_р + e_a, \text{ В},$$

здесь $D_{я2}$ и l_0 берутся из позиции 4, v_2 — из позиции 5, τ_2 — из позиции 6, $w'_{с2}$ — из позиции 12, A_2 — из позиции 15, t_2, $a_п$, $h_{п2}$, $b'_{п2}$ и $b''_{п2}$ — из позиции 21.

Средняя длина силовой линии поперечного поля якоря в междуполюсном пространстве машины

$$\delta_0 \approx \frac{\tau_2 - b_0}{2}, \text{ см}.$$

Для благоприятной коммутации машин малой мощности необходимо, чтобы значение результирующей э. д. с. в секции якоря составляло:

$e < 0,5$ В в низковольтных машинах (30 В и ниже);

$e < 1,5$ В в высоковольтных машинах (110 В и выше).

В случае двухколлекторного генератора расчет коллектора и щеток и проверка коммутации по позициям гл. 1 производятся для каждой обмотки якоря в отдельности.

1-6. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА МАШИНЫ

Целью расчета магнитной системы электродвигателей и генераторов постоянного тока малой мощности является:

1) определение размеров магнитной системы машины — сечения и длины полюсов и станины, сечения сердечника якоря;

2) определение необходимой м. д. с. возбуждения;

3) построение кривой намагничивания машины.

Имеются разнообразные конструкции магнитных систем электродвигателей и генераторов постоянного тока малой мощности, однако не все они в одинаковой мере распространены. Наиболее часто встречающиеся из них представлены на рис. 1.13.

Магнитная система малых электродвигателей постоянного тока обычно выполняется или в виде сплошной стальной станины с отъемными цельными или шихтованными полюсами (рис. 1.13, *а*), или же в виде шихтованной станины вместе с полюсами (рис. 1.13, *б*).

Расход меди на обмотку возбуждения при шихтованной станине получается несколько большим, чем при отъемных полюсах вследствие увеличенной средней длины витка катушки. Шихтованная станина и полюсы штампуются из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

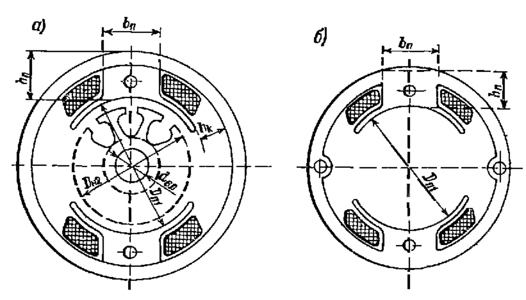


Рис. 1.13. Конструкции магнитных систем малых машин:
а — с отъемными полюсами; *б* — шихтованная система

Магнитная система генераторов постоянного тока малой мощности обычно выполняется в виде сплошного стального корпуса с отъемными цельными или шихтованными полюсами (рис. 1.13,*а*).

Катушки обмотки возбуждения заготовляются предварительно на шаблоне и затем укладываются на полюсы при сборке машины.

33. Длина воздушного зазора под полюсом

В машинах постоянного тока малой мощности длина воздушного зазора может быть определена по следующим приближенным формулам:

для электродвигателей продолжительного режима работы

$$\delta \approx 0{,}25 \frac{\tau_2 A_2}{B_\delta} \cdot 10^{-4}, \text{ см};$$

для электродвигателей кратковременного режима работы

$$\delta \approx 0{,}15 \frac{\tau_2 A_2}{B_\delta} \cdot 10^{-4}, \text{ см};$$

для генераторов

$$\delta \approx 0{,}4 \frac{\tau_2 A_2}{B_\delta} \cdot 10^{-4}, \text{ см};$$

здесь B_δ берется из позиции 3, τ_2 — из позиции 6, A_2 — из позиции 15.

В двухколлекторном генераторе под A_2 понимается суммарная линейная нагрузка двух обмоток якоря.

34. Высота сердечника якоря

$$h_{c2} = \frac{D_{н2} - (2h_{п2} + d_{вл})}{2}, \text{ см},$$

где диаметр вала по опыту построенных машин малой мощности можно принять

$$d_{вл} \approx (0{,}18 \div 0{,}24) D_{н2}, \text{ см}.$$

Проверка индукции в сердечнике якоря

$$B_{c2} = \frac{\Phi_\delta \cdot 10^4}{2 \cdot 0{,}93 h_{c2} l_0}, \text{ Т},$$

где $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4; Φ_δ — из позиции 8; $h_{п2}$ — из позиции 21; 0,93 — коэффициент, учитывающий лаковую изоляцию между листами пакета якоря.

Максимальная индукция в сердечнике якоря B_{c2} допускается до 1,3 — 1,5 Т.

35. Размеры полюса

Осевая длина полюса в малых машинах

$$l_п = l_0, \text{ см}.$$

Высота сердечника полюса малых машин предварительно может быть принята:

$$h_п = (0{,}25 \div 0{,}40) D_{н2}, \text{ см},$$

где $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4.

Окончательная высота полюса уточняется при размещении обмотки возбуждения на полюсе.

Индукция в сердечнике полюса $B_п$ в машинах для продолжительного режима работы принимается в пределах 1,0 — 1,5 Т, а в машинах для кратковременного режима — в пределах 1,2—1,6 Т.

Тогда поперечное сечение сердечника полюса будет

$$Q_п = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{B_п}, \text{ см}^2.$$

Ширина сердечника полюса

$$b_п = \frac{Q_п}{k_2 l_п}, \text{ см},$$

где Φ_δ берется из позиции 8; $\sigma = 1{,}08 \div 1{,}12$ — коэффициент магнитного рассеяния для малых машин; $k_2 = 0{,}95$ — коэффициент заполнения сечения полюса сталью при шихтованных полюсах; в случае цельных полюсов $k_2 = 1{,}0$.

36. Размеры станины

Поперечное сечение станины

$$Q_{c1}=\frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{2B_{c1}}, \text{ см}^2,$$

где индукция в станине B_{c1} в машинах для продолжительного режима работы принимается в пределах 1,0 — 1,4 Т, а в машинах для кратковременного режима этот предел может быть повышен до 1,5 Т.

Осевая длина станины (в сантиметрах) обычно:
у станины с отъемными полюсами (рис. 1.13, *а*)

$$l_1=l_0+(3\div5),$$

у шихтованной станины (рис. 1.13, *б*)

$$l_1 = l_0.$$

Высота станины

$$h_{c1}=\frac{Q_{c1}}{k_2 l_1}, \text{ см},$$

где l_0 берется из позиции 4; Φ_δ — из позиции 8; σ — из позиции 35.

В случае шихтованной станины

$$k_2=0{,}95;$$

в случае цельной стальной станины

$$k=1{,}0.$$

37. Эскиз магнитной системы машины (в масштабе)

Из эскиза магнитной системы машины окончательно определяются средние длины путей (в сантиметрах) магнитного поля в каждом участке:

а) длина станины L_{c1};
б) длина сердечников полюсов $L_п = 2h_п$;
в) длина воздушного зазора $L_\delta = 2\delta$;
г) длина зубцов якоря $L_{з2} = 2h_{з2}$;
д) длина сердечника якоря

$$L_{c2}\approx\frac{\pi(D_{н2}-2h_{п2}-h_{c2})}{2p},$$

где $D_{н2}$ берется из позиции 4; $2p$ — из позиции 6; $h_{п2}$ — из позиции 21; h_{c2} — из позиции 34.

38. М. д. с. для воздушного зазора

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta=\frac{t_2+10\delta}{b'_{з2}+10\delta}.$$

М. д. с. для воздушного зазора

$$F_\delta = 1{,}6 B_\delta k_\delta \delta \cdot 10^4,$$

где B_δ берется из позиции 3; t_2 и $b'_{з2}$ — из позиции 21; δ — из позиции 33.

39. М. д. с. для зубцов якоря

Индукция (в теслах) по трем сечениям зубцов якоря в случае прямоугольного или круглого паза

$$B_{з2мин} = \frac{B_\delta t_2}{0{,}93 b'_{з2}};$$

$$B_{з2ср} = \frac{B_\delta t_2}{0{,}93 b_{з2}};$$

$$B_{з2макс} = \frac{B_\delta t_2}{0{,}93 b''_{з2}}.$$

М. д. с. для зубцов

$$F_{з2} = \frac{H_{з2мин} + 4H_{з2ср} + H_{з2макс}}{6} L_{з2},$$

где t_2, $b'_{з2}$, $b_{з2}$, $b''_{з2}$ берутся из позиции 21; $L_{з2}$ — из позиции 37; $H_{з2мин}$, $H_{з2ср}$, $H_{з2макс}$ — из кривой намагничивания рис. 1.30. В случае трапецеидальных пазов с одинаковой толщиной зубца по высоте определяется только одно значение индукции и удельной м. д. с. в зубце.

40. М. д. с. для сердечника якоря

Индукция в сердечнике якоря

$$B_{c2} = \frac{\Phi_\delta \cdot 10^4}{2 \cdot 0{,}93 h_{c2} l_0}, \text{ Т}.$$

М. д. с. для сердечника якоря

$$F_{c2} = H_{c2} L_{c2},$$

где l_0 берется из позиции 4; Φ_δ — из позиции 8; h_{c2} — из позиции 34; L_{c2} — из позиции 37; H_{c2} — из кривой намагничивания рис. 1.30.

41. М. д. с. для сердечников полюсов

Индукция в сердечнике полюса

$$B_п = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{k_2 b_п l_п}, \text{ Т}.$$

М. д. с. для сердечника якоря

$$F_п = H_п L_п,$$

где k_2, σ, $b_п$ и $l_п$ берутся из позиции 35; $L_п$ — из позиции 37; $H_п$ — из кривой намагничивания рис. 1.30 или 1.31.

42. М. д. с. для станины

Индукция в станине

$$B_{с1} = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{2 k_2 h_{с1} l_1}, \text{ Т}.$$

М. д. с. для станины

$$F_{с1} = H_{с1} L_{с1},$$

где Φ_δ берется из позиции 8; σ — из позиции 35; k_2, $h_{с1}$ и l_1 — из позиции 36; $L_{с1}$ — из позиции 37; $H_{с1}$ — из кривой намагничивания рис. 1.30 или 1.31.

43. М. д. с. для воздушного зазора в стыке между станиной и отъемными полюсами

Индукция в зазоре стыка

$$B_{с\delta} = B_п, \text{ Т}.$$

М. д. с. для воздушного зазора в стыке

$$F_{с\delta} = 1{,}6 B_п \delta_с \cdot 10^4,$$

где $B_п$ берется из позиции 41; длина эквивалентного воздушного зазора в месте стыка при шлифованных поверхностях соприкосновения станины и полюса может быть в среднем принята:

$$\delta_с = 0{,}0035 \div 0{,}0040 \text{ см}.$$

44. Характеристика холостого хода машины

Под характеристикой холостого хода машины понимается зависимость э. д. с. якоря от тока или м. д. с. возбуждения при постоянной скорости вращения и токе якоря, равном нулю.

С помощью этой характеристики определяются: у электродвигателей — характеристики скорости и вращающего момента, у генераторов — внешняя характеристика.

Расчет характеристики холостого хода машины для удобства обычно сводится в табл. 1.3. В основной столбец ее, соответствующий номинальной э. д. с. якоря E, вписываются значения полезного поля в воздушном зазоре и индукций отдельных участков магнитной системы из позиций 2, 8, 39, 40, 41, 42 и 43. Остальные столбцы таблицы заполняются значениями этих величин, измененными пропорционально величинам э. д. с.

Далее для каждого участка магнитной системы машины по соответствующим значениям индукции и кривым намагничивания рис. 1.30 и рис. 1.31 определяются удельные м. д. с. и вписываются в соответствующие строку и столбец табл. 1.3.

Таблица 1.3

Величина	kE				
	$0{,}5E$	$0{,}8E$	E	$1{,}15E$	$1{,}3E$
Φ_δ					
B_δ					
$B_{з2мин}$					
$B_{з2ср}$					
$B_{з2макс}$					
$B_{с2}$					
$B_{п}$					
$B_{с1}$					
$B_{с\delta}$					
$H_{з2мин}$					
$H_{з2ср}$					
$H_{з2макс}$					
$H_{з2}=\dfrac{H_{з2мин}+4H_{з2ср}+H_{з2макс}}{6}$					
$H_{с2}$					
$H_{п}$					
$H_{с1}$					
$F_\delta = 1{,}6B_\delta k_\delta \delta \cdot 10^4$					
$F_{з2}=H_{з2}L_{з2}$					
$F_{с2}=H_{с2}L_{с2}$					
$F_{п}=H_{п}L_{п}$					
$F_{с1}=H_{с1}L_{с1}$					
$F_{с\delta}=1{,}6B_{с\delta}\delta_{с}\cdot 10^4$					
$F_{в}=\Sigma F$					

Затем производится умножение удельных м. д. с. на средние длины соответствующих участков. Сложение этих произведений дает общую м. д. с. возбуждения на пару полюсов:

$$F_{в}=F_\delta+F_{з2}+F_{с2}+F_{п}+F_{с1}+F_{с\delta}.$$

Наконец, строится характеристика холостого хода (рис. 1.15).

$$E=f(F_{в}).$$

Реакция якоря в машинах постоянного тока, оказывающая определенное влияние на рабочие свойства машины, в общем случае может проявляться в виде: а) поперечной составляющей м. д. с., якоря F_q, б) продольной составляющей ее F_β и в) продольной м. д. с. добавочных коммутационных токов короткозамкнутых секций обмотки якоря при ускоренной или замедленной коммутации тока в них $F_к$.

В машинах постоянного тока без добавочных полюсов и положении щеток на геометрической нейтрали процесс коммутации тока в короткозамкнутых секциях якоря получается замедленным. В этом случае коммутационная м. д. с. якоря у электродвигателей усиливает поле полюсов, а у генераторов — ослабляет его.

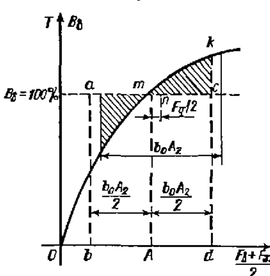


Рис. 1.14. Переходная характеристика машины

С другой стороны, поперечная м. д. с. якоря всегда ослабляет поле полюсов, продольная же м. д. с. у малых электродвигателей обычно усиливает, а у генераторов ослабляет его, ввиду этого суммарная м. д. с. якоря машины будет

у электродвигателей

$$F_R = F_q - F_\beta - F_к,$$

у генераторов

$$F_R = F_q + F_\beta + F_к.$$

Поперечная составляющая м. д. с. якоря F_q определяется по так называемой переходной характеристике машины

$$B_\delta = f\frac{(F_\delta + F_{з2})}{2},$$

построение которой производится по данным табл. 1.3.

Определение F_q показано на рис. 1.14, где прямоугольник $abdc$ с основанием b_0A_2 передвигается вправо так, чтобы площади заштрихованных криволинейных треугольников были равны, тогда искомая поперечная м. д. с. якоря на пару полюсов будет

$$F_q = 2mn.$$

В случае двухколлекторного генератора в произведении b_0A_2 под величиной A_2 понимается суммарная линейная нагрузка двух обмоток якоря.

Продольная составляющая м. д. с. якоря F_β возникает вследствие самопроизвольного сдвига щеток с геометрической нейтрали по механическим причинам и неточностям установки и в ма-

лых машинах, вообще говоря, незначительна. Она определяется по известной формуле

$$F_\beta = 2b_\beta A_2,$$

где $b_\beta = 0{,}015 \div 0{,}030$ см; A_2 берется из позиции 15.

Продольная коммутационная м. д. с. якоря $F_к$ в машинах малой мощности возникает благодаря смещению нейтральной точки обмотки с геометрической нейтрали при замедленной коммутации тока в короткозамкнутых секциях. Ее величина может быть определена по следующей формуле [5]:

$$F_к = b_к A_{2н} \frac{i_2^2 \omega}{a_0' + b_0' i_2 + \omega i_2} \left(1 + \frac{0{,}2\pi\tau_2}{\delta_0 \lambda_2} \cdot 10^{-8}\right),$$

где $i_2 = I/I_2$ — относительная величина тока якоря в долях номинального значения; $\omega = \Omega/\Omega_н$ — относительная величина угловой скорости вращения якоря в долях номинального значения; $A_{2н}$ — линейная нагрузка якоря при номинальном токе согласно позиции 15;

$$a_0' = \frac{1{,}7a'A}{\Delta U_щ}; \quad b_0' = \frac{1{,}7b'A}{\Delta U_щ},$$

при этом

$$A = \frac{R_щ T_к}{L_\sigma}; \quad R_щ = \frac{\Delta U_щ}{2I_щ}; \quad T_к = \frac{b_щ}{v_к};$$

$L_\sigma = \dfrac{w_{c2}' \lambda_2 A_{2н} l_0 b_щ'}{i_{2н}}$ — средняя эквивалентная индуктивность секции якоря, Г; $\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения в контакте двух разноименных щеток, В; $I_щ = I_2/p$ — ток одной щетки, А; $i_{2н} = I_2/2a$; l_0 берется из позиции 4; τ_2 — из позиции 6; w_{c2}' — из позиции 12, $v_к$ — из позиции 27; $b_щ$ — из позиции 29; $b_к$, $b_щ'$, λ_2 и δ_0 — из позиции 32.

Переходное падение напряжения в контакте щеток при номинальных плотностях тока в них в среднем можно принять:

щетки	М-1, М-6:	$\Delta U_щ = 1{,}5$ В;	$a' = 0{,}8$ В;	$b' = 0{,}7$ В;
»	МГ-4:	$\Delta U_щ = 1$ В;	$a' = 0{,}6$ В;	$b' = 0{,}4$ В;
»	ЭГ-2, ЭГ-8:	$\Delta U_щ = 2{,}5$ В;	$a' = 2{,}1$ В;	$b' = 0{,}4$ В.

где a' и b' — составляющие переходного падения напряжения в контакте щеток согласно [5].

В случае двухколлекторного генератора коммутационная м. д. с. определяется отдельно для каждой обмотки якоря и затем суммируется.

46. Полная м. д. с. возбуждения машины при нагрузке на пару полюсов

Последовательное возбуждение электродвигателей

$$F_в = F_δ + F_{з2} + F_{с2} + F_п + F_{с1} + F_{сб} + F_R,$$

где $F_δ$, $F_{з2}$, $F_{с2}$, $F_п$, $F_{с1}$, $F_{сб}$, F_R берутся из позиций 38—43 и 45 или из основного столбца табл. 1.3, поскольку расчет этой м. д. с. произведен для значений поля и индукций, соответствующих э. д. с. якоря E при нагрузке двигателя.

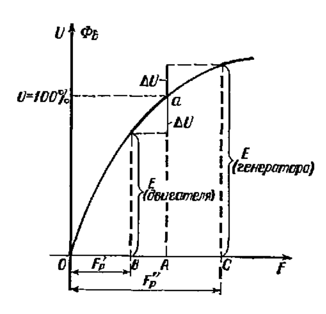


Рис. 1.15. Характеристика холостого хода машины

$F_р'$ — результирующая м. д. с. для двигателя; $F_р''$ — то же для генератора

Параллельное возбуждение электродвигателей и генераторов.

Э. д. с. якоря двигателя $E = U - \Delta U_2 - \Delta U_щ = U - \Delta U$; с помощью этой э. д. с. и характеристики холостого хода (рис. 1.15) определяется результирующая м. д. с. $F_р'$ и полная м. д. с. возбуждения

$$F_в = F_р' + F_R.$$

Э. д. с. якоря генератора $E = U + \Delta U_2 + \Delta U_щ = U + \Delta U$; аналогично предыдущему из рис. 1.15 определяется результирующая м. д. с. $F_р''$ и полная м. д. с. возбуждения:

$$F_в = F_р'' + F_R,$$

где U берется по заданию; ΔU_2 — из позиции 24; $\Delta U_щ$ — из табл. 1.1 позиции 28 согласно принятой марки щетки; F_R — из позиции 45; $F_р'$ и $F_р''$ — из рис. 1.15.

1-7. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Расчет обмоток возбуждения электродвигателей и генераторов постоянного тока заключается в определении числа их витков на полюс и сечения провода и соответствующем размещении обмотки на сердечниках полюсов.

Электродвигатель последовательного возбуждения

47. Число витков последовательной обмотки возбуждения на полюс

$$W_с = \frac{F_в}{2I_2},$$

где I_2 берется из позиции 2; $F_в$ — из позиции 46.

48. Сечение и диаметр провода обмотки возбуждения

Предварительно

$$q_1' = \frac{I_2}{j_1'}, \text{ мм}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2; j_1' — предварительное значение плотности тока в обмотке возбуждения, выбираемое по кривым рис. 1.16 в зависимости от режима работы, типа исполнения и вращающего момента электродвигателя, определяемого в позиции 16.

По ГОСТ из приложения I окончательно выбираются ближайшие сечение и диаметр провода:

$$q_1 = \ldots; \quad d_1/d_{1и} = \ldots$$

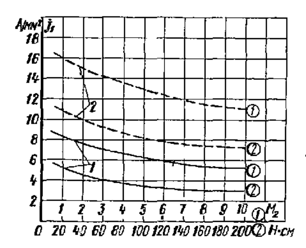


Рис. 1.16. Кривые допустимых плотностей тока в обмотке возбуждения малых машин постоянного тока закрытого исполнения в зависимости от вращающего момента при разных режимах работы

1 — продолжительный режим; 2 — кратковременный режим

49. Окончательная плотность тока в проводнике обмотки возбуждения

$$j_1 = \frac{I_2}{q_1}, \ A/\text{мм}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2; q_1 — из позиции 48.

50. Сопротивление последовательной обмотки возбуждения в нагретом состоянии при ϑ°C

$$r_c = k_\Theta \frac{2pW_c l_{ср1}}{5700 q_1}, \text{ Ом};$$

где $2p$ — число полюсов машины; W_c берется из позиции 47; q_1 — из позиции 48; $k_\Theta = 1 + 0{,}004\,(\vartheta - 20)$ — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки при нагревании ее от 20 до ϑ° С; $l_{ср1}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения, определяемая по эскизу расположения обмотки на полюсе, см.

В случае отъемных полюсов (рис. 1.13, *а*) внутренний периметр катушки возбуждения определяется размерами поперечного сечения сердечника полюса $b_п$ и $l_п$; в случае же шихтованной станины, (рис. 1.13, *б*) нужно размер $b_п$ увеличить на величину $(b_0 - b_п)/2$ для того, чтобы было возможным надевание катушки на сердечник полюса со стороны полюсного наконечника. Здесь b_0 берется из позиции 6; $b_п$ и $l_п$ — из позиции 35.

51. Падение напряжения в обмотке возбуждения

$$\Delta U_1 = I_2 r_c, \text{ В},$$

где I_2 берется из позиции 2; r_c — из позиции 50.

52. Проверка величины э. д. с. якоря при нагрузке

$$E = U - \Delta U_2 - \Delta U_{щ} - \Delta U_1, \text{ В},$$

где U берется по заданию; ΔU_2 — из позиции 24; $\Delta U_{щ}$ — из табл. 1.1 позиции 28 согласно принятой марки щеток; ΔU_1 — из позиции 51.

Полученная здесь величина э. д. с. E не должна отличаться от предварительного значения ее в позиции 2 более чем на $\pm 3\%$. При большем отклонении ее от предварительного значения и для получения заданной скорости вращения нужно ввести поправку в величину требуемой м. д. с. возбуждения электродвигателя. Для этого по полученному в данной позиции значению э. д. с. E и характеристике холостого хода (рис. 1.15) определяется результирующая м. д. с. $F'_р$ и с помощью ее полная м. д. с. возбуждения

$$F_в = F'_р + F_R.$$

После этого производится окончательный перерасчет величин позиций 47, 50, 51 и 52.

53. Потребная площадь окна для размещения обмотки возбуждения на полюсе

$$Q'_c = \frac{W_c d_{1и}^2}{f'_0}, \text{ мм}^2,$$

где $f'_0 = 0{,}82 \div 0{,}88$ — коэффициент, учитывающий возможные неточности намотки рядов проволоки в катушке; W_c берется из позиции 47; $d_{1и}$ — из позиции 48.

54. Фактическая площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q_c \approx (1{,}1 \div 1{,}2)\, Q'_c, \text{ мм}^2,$$

где Q'_c берется из позиции 53.

На основании этих данных и выбранной конструкции магнитной системы производится размещение обмотки возбуждения и уточнение высоты сердечника полюса.

Электродвигатель и генератор параллельного возбуждения

55. Сечение и диаметр провода обмотки возбуждения

Сечение q_1 определяется по формуле:

$$q_1 = k_\Theta \frac{p F_в l_{срi}}{5700 U}, \text{ мм}^2,$$

где U берется по заданию; p — из позиции 6; $F_в$ — из позиции 46; k_Θ — из позиции 50; $l_{ср1}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения определяемая так, как указано в позиции 50, см.

По ГОСТ из приложения I окончательно выбираются ближайшие сечение и диаметр провода:

$$q_1 = \ldots; \quad d_1/d_{1и} = \ldots$$

56. Плотность тока в обмотке возбуждения

$$j_1 = \frac{I_ш}{q_1}, \text{ А/мм}^2,$$

где $I_ш$ берется из позиции 2; q_1 — из позиции 55.

Величина плотности тока в обмотке возбуждения, в зависимости от режима работы и вращающего момента машины, должна соответствовать данным рис. 1.16. Если полученная в этой позиции плотность тока не вполне согласовывается с данными рисунка, то нужно соответственно несколько изменить величину тока возбуждения $I_ш$, предварительно принятого в позиции 2.

57. Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$W_ш = \frac{F_в}{2I_ш},$$

где $I_ш$ берется из позиции 2 с уточнением в позиции 56; $F_в$ — из позиции 46.

58. Размещение обмотки возбуждения на сердечнике полюса

Это размещение обмотки производится так же, как указано в позициях 53 и 54.

59. Сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии при $\vartheta°$ С

$$r_ш = k_\Theta \frac{2pW_ш l_{ср1}}{5700 q_1}, \text{ Ом},$$

где $2p$ — берется из позиции 6; q_1 — из позиции 55; $W_ш$ — из позиции 57; $L_{ср1}$ уточняется после размещения обмотки возбуждения на сердечнике полюса.

Полученное здесь сопротивление обмотки возбуждения должно при заданном напряжении машины определять установленное в позиции 56 значение тока возбуждения

$$I_ш = U/r_ш, \text{ А}.$$

1-8. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ

Потери в электродвигателях и генераторах постоянного тока малой мощности слагаются из следующих видов потерь:

1) потери в обмотках якоря и возбуждения машины;

2) переходные потери в контактах щеток и коллектора;

3) магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря;

4) механические потери (трение в подшипниках, якоря о воздух, щеток о коллектор);

5) добавочные потери.

60. Потери в обмотках якоря и возбуждения

а. Потери в обмотке якоря

$$P_{м2} = I_2^2 r_2, \text{ Вт.}$$

б. Потери в последовательной обмотке возбуждения

$$P_{м.\,с} = I_2^2 r_с, \text{ Вт.}$$

в. Потери в параллельной обмотке возбуждения

$$P_{м.\,ш} = I_ш^2 r_ш = U I_ш, \text{ Вт.}$$

В этих формулах I_2 берется из позиции 2; r_2 — из позиции 23; $r_с$ — из позиции 50; $I_ш$ — из позиции 56; $r_ш$ — из позиции 59.

В двухколлекторном генераторе потери в якоре определяются для двух обмоток его и затем суммируются.

61. Переходные потери в контактах щеток и коллектора

$$P_{щ.\,к} = I_2 \Delta U_щ, \text{ Вт,}$$

где I_2 берется из позиции 2; $\Delta U_щ$ — из табл. 1.1 позиции 28 согласно принятой марки щеток.

В двухколлекторном генераторе эти потери вычисляются для каждого коллектора и суммируются.

62. Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря

а. Масса стали сердечника якоря

$$G_{с2} = 5{,}5\,(D_{н2} - 2h_{п2})^2 l_0 \cdot 10^{-3}, \text{ кг.}$$

б. Масса стали зубцов якоря

$$G_{з2} = 7{,}8 z_2 b_{з2} h_{п2} l_0 \cdot 10^{-3}, \text{ кг,}$$

где $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4; z_2 — из позиции 10; $b_{з2}$ и $h_{п2}$ — из позиции 21.

в. Потери на гистерезисе и вихревые токи в стали сердечника якоря

$$P_{с2} = p_{с2} B_{с2}^2 G_{с2}, \text{ Вт.}$$

г. Потери на гистерезис и вихревые токи в стали зубцов якоря

$$P_{з2} = p_{з2} B_{з2}^2 G_{з2}, \text{ Вт.}$$

д. Полные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря

$$\Sigma P_c = P_{c2} + P_{з2}, \text{ Вт},$$

где $B_{з2}$ берется из позиции 39; B_{c2} — из позиции 40.

е. Удельные потери в стали

$$p_{c2} = 2\varepsilon\left(\frac{f_2}{100}\right) + 2,5\rho\left(\frac{f_2}{100}\right)^2, \text{ Вт/кг};$$

$$p_{з2} = 1,5\varepsilon\left(\frac{f_2}{100}\right) + 3\rho\left(\frac{f_2}{100}\right)^2, \text{ Вт/кг},$$

при этом f_2 берется из позиции 7; ε и ρ — из табл. 1.4.

Таблица 1.4

Марка стали по ГОСТ 802—58	Толщина листа, мм	ε	ρ
Э11	0,50	4,1	5,1
Э12	0,50	3,5	4,4
Э31	0,35	1,8	2,1
Э44	0,35	1,1	1,4
Э44	0,20	0,8	1,3

63. Механические потери в машине

Потери на трение щеток о коллектор

$$P_{т.щ} = \mu p_щ S'_щ v_к, \text{ Вт}.$$

В двухколлекторном генераторе эти потери вычисляются для каждого коллектора и суммируются.

Потери на трение в шарикоподшипниках можно приближенно определить по формуле [1].

$$P_{т.п} = k'\frac{G_a}{d_0}v_2 \cdot 10^{-3} = k_m G_a n \cdot 10^{-3}, \text{ Вт}.$$

Коэффициент k_m для малых машин с шарикоподшипниками (по опытным данным) составляет $k_m = 1 \div 3$, при этом большее его значение относится к нижнему пределу рассматриваемого здесь диапазона мощностей.

Масса (вес) якоря

$$G_a = \frac{\pi}{4}\left(D_{н2}^2 l_0 \gamma_a + D_к^2 l_к \gamma_к\right) \cdot 10^{-3}, \text{ кг}.$$

Средняя удельная масса якоря и коллектора

$$\gamma_a = \gamma_к \approx 8,5 \text{ г/см}^3.$$

[1] СЭТ, т. V, отд. 33, стр. 92.

Потери на трение якоря о воздух вообще не поддаются точному учету; для машин малой мощности при скоростях вращения примерно до 12 000 об/мин их можно приближенно определить по следующей формуле:

$$P_{т.в} \approx 2D_{н2}^3 n^3 l_0 \cdot 10^{-14}, \text{ Вт},$$

а при скоростях вращения более 15 000 об/мин — по формуле

$$P_{т.в} \approx 0{,}3 D_{н2}^5 \left(1 + 5\frac{l_0}{D_{н2}}\right) n^3 \cdot 10^{-16}, \text{ Вт}.$$

Полные механические потери в машине (без вентиляции)

$$P_{мх} = P_{т.щ} + P_{т.п} + P_{т.в}, \text{ Вт}.$$

Здесь $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4; $D_к$ и $v_к$ — из позиции 27; μ и $P_щ$ — из табл. 1.1 позиции 28 согласно принятой марки щеток; $S'_щ$ — общая площадь прилегания к коллектору всех щеток, определяемая по данным позиции 29; $l_к$ берется из позиции 31; n — скорость вращения по заданию.

64. Общие потери в машине при полной нагрузке

$$\Sigma P = \xi (P_{м2} + P_{м1} + P_{щ.к} + \Sigma P_с + P_{мх}), \text{ Вт},$$

где $P_{м2}$ и $P_{м1}$ – берутся из позиции 60 (для соответствующей обмотки); $P_{щ.к}$ — из позиции 61; $\sum P_с$ — из позиции 62; $P_{мх}$ — из позиции 63.

Коэффициент $\xi = 1{,}08 \div 1{,}12$ учитывает добавочные потери в машине.

65. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке машины

У электродвигателей

$$\eta = \frac{UI - \Sigma P}{UI} \cdot 100,$$

у генераторов

$$\eta = \frac{UI}{UI + \Sigma P} \cdot 100,$$

где $I = I_2$ — в электродвигателях последовательного возбуждения; $I = I_2 + I_ш$ — в электродвигателях параллельного возбуждения; $I = I_2 - I_ш$ — в генераторах параллельного возбуждения.

При этом I_2 и $I_ш$ берутся из позиции 2; $\sum P$ — из позиции 64. В случае двухколлекторного радиогенератора

$$UI = P_{2н} + P_{2в}.$$

Если полезная мощность электродвигателя, определенная из соотношения $P_2 = UI - \sum P$, будет несколько отличаться от за-

данной номинальной, то для получения последней следует определить соответствующее ей новое значение тока якоря из уравнения

$$I_2=\frac{A}{2}-\sqrt{\frac{A^2}{4}-B};$$

после этого нужно внести поправку в значение потерь $P_{м2}$, $P_{м1}$, $P_{щ.к}$ и $\sum P$ по позициям 60, 61 и 64 и вычислить окончательное значение к. п. д. электродвигателя.

Коэффициенты для электродвигателя последовательного возбуждения

$$A=\frac{\frac{U}{\zeta}-\Delta U_{щ}}{r_2+r_c};\quad B=\frac{\frac{P_2}{\zeta}+\Sigma P_c+P_{мх}}{r_2+r_c};$$

для электродвигателя параллельного возбуждения

$$A=\frac{\frac{U}{\zeta}-\Delta U_{щ}}{r_2};\quad B=\frac{\frac{P_2}{\zeta}+\Sigma P_c+P_{мх}+UI_{ш}\left(1-\frac{1}{\zeta}\right)}{r_2};$$

при этом P_2 и U берутся по заданию; $I_{ш}$ — из позиции 2; r_2 — из позиции 23; $\Delta U_{щ}$ — из табл. 1.1 позиции 28 согласно принятой марки щеток; r_c — из позиции 50; $\sum P_c$ — из позиции 62, $P_{мх}$ — из позиции 63; ζ — из позиции 64.

66. Рабочие характеристики электродвигателей

Под рабочими характеристиками электродвигателей постоянного тока малой мощности понимаются графически изображенные зависимости тока якоря, потребляемой мощности, скорости вращения, полезной мощности на валу и к. п. д. от полезного вращающего момента при постоянном напряжении на зажимах (рис. 1.17):

$$I_2=f(M_2);\quad P_1=f(M_2);\quad n=f(M_2);$$
$$P_2=f(M_2);\quad \eta=f(M_2).$$

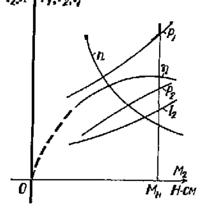


Рис. 1.17. Рабочие характеристики малого двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Расчет рабочих характеристик электродвигателей для удобства можно свести в табл. 1.5. В столбец ее, соответствующий номинальному потребляемому двигателем току из сети, выписываются значения отдельных величин из позиций 24, 28, 44, 45 и 60—65. При этом суммарная м. д. с. реакции якоря F_R по позиции 45 принимается пропорциональной току якоря, а величина полезного поля полюса Φ_δ, для каждого значения потребляемого тока опре-

Таблица 1.5

Величина		Потребляемый двигателем ток из сети, А			
		0,5I	0,8I	I	1,2I
$I_ш$	А[1]				
$I_2 = I - I_ш$	А[2]				
$\Delta U_2 = I_2 r_2$	В				
$\Delta U_с = I_2 r_с$	В[3]				
$\Delta U_щ =$	В				
$\Delta U = \Delta U_2 + \Delta U_щ + \Delta U_с$ . .	В[4]				
$E = U - \Delta U$	В				
$F_в = 2W_с I_2^5$					
$F_R =$					
$F'_р = F_в - F_R$					
$\Phi_\delta =$	Вб				
$n = \dfrac{60aE}{pN_2\Phi_\delta}$	об/мин				
$P_{м2} = I_2^2 r_2$	Вт				
$P_{м1} = I_2^2 r_с$	Вт[6]				
$P_{щ.к} = I_2 \Delta U_щ$	Вт				
$\Sigma P_с =$	Вт				
$P_{мх} =$	Вт				
$\Sigma P = \zeta (P_{м2} + P_{м1} + P_{щ.к} + \Sigma P_с + P_{мх})$	Вт				
$P_1 = UI$	Вт				
$P_2 = UI - \Sigma P$	Вт				
$\eta = \dfrac{P_2}{P_1} \cdot 100$	%				
$M_2 = 955 \cdot \dfrac{P_2}{n}$	Н·см				

[1] Для двигателя параллельного возбуждения.

[2] Для двигателя параллельного возбуждения; при последовательном возбуждении $I_2 = I$.

[3] Для двигателя последовательного возбуждения.

[4] Для двигателя последовательного возбуждения; при параллельном возбуждении $\Delta U_с = 0$.

[5] Для двигателя последовательного возбуждения; при параллельном возбуждении $F_в = 2W_ш I_ш$.

[6] Для двигателя последовательного возбуждения; при параллельном возбуждении $P_{м1} = UI_ш$.

деляется по характеристике холостого хода рис. 1.15 с помощью результирующей м. д. с. $F_р = F_в - F_R$.

По данным табл. 1.5 строятся кривые рабочих характеристик двигателя, как показано на рис. 1.17.

67. Кратность наибольшего пускового момента электродвигателя

При пуске в ход электродвигателей постоянного тока малой мощности требуемый от них пусковой вращающий момент обусловливается характером нагрузки на валу и условиями разгона механизма. Обычно пусковой момент таких двигателей должен значительно превосходить номинальный, с тем чтобы он был способен преодолевать повышенный нагрузочный момент на валу. У электродвигателей постоянного тока кратность наибольшего пускового момента по отношению к номинальному должна быть не менее 4 –5, а в ряде случаев и более.

Как известно, вращающий момент электродвигателя постоянного тока определяется следующим уравнением:

$$M = \frac{N_2}{2\pi} \frac{p}{a} \cdot 10^2 \cdot \Phi_\delta I_2, \text{ Н·см,} \tag{1-8}$$

где N_2 — число проводников обмотки якоря; $2a$ и $2p$ — числа параллельных ветвей обмотки якоря и полюсов электродвигателя; Φ_δ — полезное поле полюса в воздушном зазоре, Вб; I_2 — ток якоря, А.

Как показывает уравнение (1-8), при данных параметрах якоря кратность наибольшего пускового вращающего момента электродвигателя по отношению к номинальному, очевидно будет иметь место при наибольшем поле в воздушном зазоре и максимальном токе якоря, получающихся при его неподвижном состоянии:

$$m_п = \frac{M_{пm}}{M} = \varphi_п i_{2m} \tag{1-9}$$

где $\varphi_п = \Phi_{\delta п}/\Phi_\delta$ — относительное значение полезного поля полюса в воздушном зазоре при пуске в ход двигателя в долях его номинального значения; $i_{2m} = I_{2m}/I_2$ — кратность пускового тока в долях номинального тока якоря, составляющая

$$i_{2m} = \frac{1 - \varepsilon_щ}{\varepsilon_2}; \tag{1-10}$$

при этом $\varepsilon_2 = I_2 r_2/U$ — относительное падение напряжения в цепи якоря; $\varepsilon_щ = \Delta U_щ/U$ — относительное падение напряжения в контакте щеток и коллектора; U — напряжение на зажимах двигателя, В; r_2 — омическое сопротивление цепи якоря, Ом; $\Delta U_щ$ — падение напряжения в контактах двух разноименных щеток и коллектора, В.

Характер зависимости кратности пускового момента от параметров электродвигателей в значительной мере определяется способом их возбуждения.

Электродвигатель параллельного возбуждения

В этом случае, пренебрегая влиянием м. д. с. якоря на полезное поле полюса в воздушном зазоре и предполагая предварительно включенной в сеть обмотку возбуждения, можно положить $\varphi_п = 1$. Тогда кратность наибольшего пускового момента электродвигателя параллельного возбуждения по отношению к номинальному по уравнению (1-9) будет

$$m_п = i_{2m}. \qquad (1\text{-}11)$$

Если выразить омическое сопротивление якоря через обмоточные данные и размеры последнего, то с учетом уравнений (1-10) и (1-11) кратность наибольшего пускового момента рассматриваемого двигателя

$$m_п = \frac{5700\,(1-\varepsilon_ш)\,UI_2}{\pi D_{н2}^2\,(\xi + k)\,A_2 j_2}, \qquad (1\text{-}12)$$

где $k = 1{,}2$ при $2p = 2$; $k = 0{,}8$ при $2p = 4$; U берется по заданию; I_2 — из позиции 2; $D_{н2}$ и ξ — из позиции 4; A_2 — из позиции 15; j_2 — из позиции 18.

Таким образом, кратность наибольшего пускового момента электродвигателя параллельного возбуждения по отношению к его номинальному вращающему моменту при постоянном произведении линейной нагрузки на плотность тока в обмотке якоря обратно пропорциональна квадрату диаметра якоря, или же при данном диаметре якоря — обратно пропорциональна указанному произведению $A_2 j_2$.

Электродвигатель последовательного возбуждения

В этом случае при пуске в ход электродвигателя полезное поле полюса в воздушном зазоре вместе с током якоря достигает наибольшего значения, поэтому $\varphi_п > 1$, и кратность наибольшего пускового момента электродвигателя последовательного возбуждения будет определяться уравнением (1-9).

Величина полезного поля полюса при пуске $\Phi_{бп}$, как показывает рис. 1.18, определяется кривой намагничивания электродвигателя. Очевидно, это поле соответствует наибольшему значению тока якоря I_{2m}.

Рис. 1.18. Кривая намагничивания двигателя последовательного возбуждения

Если выразить омическое сопротивление цепи якоря через обмоточные данные и его размеры, а также через систему возбуждения, то кратность пускового тока рассматриваемого двигателя будет

$$i_{2m} = \frac{5700\,(1-\varepsilon_ш)\,UI_2}{\pi D_{н2}^2\left[(\xi + k)\,A_2 j_2 + p k_в F_в j_1\right]}, \qquad (1\text{-}13)$$

где $k_п = l_{cp1}/(\pi D^2_{н2})$; $D_{н2}$ берется из позиции 4; p — из позиции 6; $F_в$ — из позиции 46; j_1 — из позиции 49; l_{cp1} — из позиции 50.

Для определения кратности полезного поля полюса в воздушном зазоре при пуске электродвигателя $\varphi_п = \Phi_{\delta п}/\Phi_\delta$ можно кривую намагничивания (рис. 1.18) приближенно представить аналитически следующим уравнением:

$$\Phi_\delta = a_c I_2^\gamma, \qquad (1\text{-}14)$$

где

$$a_c = \frac{\Phi_\delta}{I_2^\gamma}; \quad \gamma = \frac{\log \xi_m}{\log i_m};$$

при этом, как показано на рис. 1.18, $i_m = I_2'/I_2$; $\xi_m = \Phi_\delta'/\Phi_\delta$.

Значения тока I_2' и поля Φ_δ' соответствуют точке расчетной или опытной кривой намагничивания электродвигателя, возможно дальше отстоящей от начала координат.

Тогда кратность полезного поля при пуске будет

$$\varphi_п = i_{2m}^\gamma. \qquad (1\text{-}15)$$

После этого кратность наибольшего пускового момента электродвигателя последовательного возбуждения по уравнению (1-9) будет

$$m_п = \varphi_п i_{2m} = i_{2m}^{1+\gamma}. \qquad (1\text{-}16)$$

68. Электромеханическая постоянная времени электродвигателей

Для электродвигателей малой мощности кратковременного или повторно-кратковременного режима работы и с частым реверсированием большое значение имеет величина электромеханической постоянной времени $T_м$, которая в этом случае должна быть возможно меньшей. Эту постоянную можно определить по следующему уравнению [12]:

$$T_м = \frac{Jn^2 \cdot 10^{-5}}{9{,}2 m_п P_2}, \text{ с},$$

где P_2 — номинальная мощность на валу двигателя по заданию, Вт; n — скорость вращения якоря по заданию, об/мин.; $J \approx 8D^4_{н2} l_0 \cdot 10^{-4}$ — момент инерции якоря, кг·см²; $D_{н2}$ и l_0 — диаметр и длина пакета якоря, см; $m_п$ — кратность пускового момента двигателя по уравнениям (1-12) или (1-16) позиции 67.

69. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Под внешней характеристикой генератора параллельного возбуждения понимается графически изображенная зависимость напряжения на зажимах от тока якоря при постоянных значениях

сопротивления цепи возбуждения и скорости вращения:

$$U = f(I_2) \text{ при } r_ш = \text{const}; \; n = \text{const}.$$

На рис. 1.19 представлено построение внешней характеристики рассматриваемого генератора с помощью характеристики холостого хода и характеристического треугольника abc, стороны которого принимаются пропорциональными току якоря I_2. Построение этой характеристики удобнее начинать с точки f, соответствующей номинальному напряжению при номинальном токе якоря I_2.

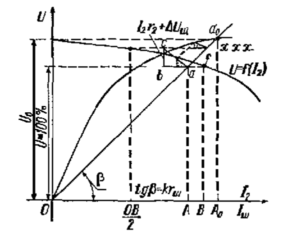


Рис. 1.19. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Построив характеристический треугольник abc при данном напряжении и токе якоря $I_2 = I + I_ш$, как указано на рис. 1.19, проводят через точку a линию падения напряжения в цепи возбуждения Oa. Пересечение этой линии с характеристикой холостого хода в точке a_0 определит напряжение на зажимах генератора U_0 при полной его разгрузке. Тогда относительное повышение напряжения на зажимах генератора при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу его будет

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_0 - U}{U} \cdot 100 = \frac{A_0a_0 - Bf}{Bf} \cdot 100.$$

1-9. РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СТАБИЛИЗАЦИЕЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ВИБРАЦИОННЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Во многих областях техники встречаются различные механизмы и устройства автоматики, в которых используются малые двигатели постоянного тока со стабилизированной скоростью вращения. К ним относятся, например, программные механизмы, телеизмерительные устройства, системы записи и воспроизведения звука и др.

Для стабилизации скорости вращения этих двигателей при переменных условиях их работы применяются специальные регуляторы скорости вращения.

Они воздействуют или на напряжение или на ток возбуждения и поддерживают постоянство скорости вращения двигателя с определенной степенью точности.

Устройства стабилизации скорости вращения малых двигателей постоянного тока могут быть подразделены на:

а) системы с центробежным регулятором скорости;

б) то же в сочетании с полупроводниковыми приборами;

в) устройства с регуляторами скорости на полупроводниковых приборах.

Стабилизация скорости вращения посредством центробежного вибрационного регулятора применяется в двигателях постоянного тока параллельного возбуждения при мощностях от нескольких единиц до сотен ватт и в двигателях последовательного возбуждения или с возбуждением постоянными магнитами при мощностях от долей до нескольких ватт.

В двигателях параллельного возбуждения стабилизация скорости вращения осуществляется изменением тока возбуждения за счет периодического шунтирования добавочного сопротивления

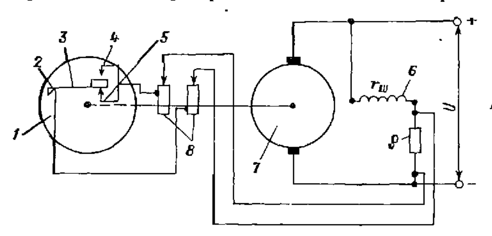


Рис. 1.20. Схема двигателя параллельного возбуждения с регулятором скорости

1 — диск; 2 — место крепления пружины; 3 — плоская пружина; 4 — установочный контакт; 5 — пусковой контакт; 6 — обмотка возбуждения; 7 — якорь; 8 — контактные кольца

в цепи возбуждения вибрирующими контактами центробежного регулятора (рис. 1.20). При вибрации контактов регулятора в установившемся режиме сопротивление цепи возбуждения двигателя скачкообразно совершает периодические колебания от минимальной величины $r_ш$ до максимальной $r_ш + \rho$ около некоторого среднего эффективного значения [12]:

$$r_{ш.\,эф} = r_ш + \rho\tau_р, \text{ Ом}, \qquad (1\text{-}17)$$

где $r_ш$ — сопротивление параллельной обмотки возбуждения, Ом; ρ — добавочное сопротивление в ее цепи, Ом (рис. 1.20); $\tau_р = t_р/(t_р + t_з)$ — относительная разомкнутость контактов регулятора $t_з$ и $t_р$ — время замкнутого и разомкнутого состояния его контактов, с.

Эффективное сопротивление $r_{ш.\,эф}$ определяет среднее значение тока возбуждения, обеспечивающего стабилизируемую скорость вращения при данном режиме работы:

$$I_ш = \frac{U}{r_ш + \rho\tau_р}, \text{ А}. \qquad (1\text{-}18)$$

При изменении режима работы двигателя постоянство его скорости вращения поддерживается автоматическим изменением относительной разомкнутости контактов регулятора, способствующим соответствующему изменению эффективного сопротивления цепи возбуждения $r_{ш.эф}$. Относительная разомкнутость контактов регулятора $\tau_р$ в предельных режимах работы изменяется от значения $\tau_р \approx 0$ — при работе двигателя вхолостую, наибольшем напряжении на его зажимах $U_{макс}$ и максимальной температуре нагрева до величины $\tau_р = 1$ — при работе его с полной нагрузкой и наименьших значениях напряжения $U_{мин}$ и температуры нагрева.

Если в цепи параллельной обмотки возбуждения двигателя (рис. 1.20) зашунтировать добавочное сопротивление ρ, то при соб-

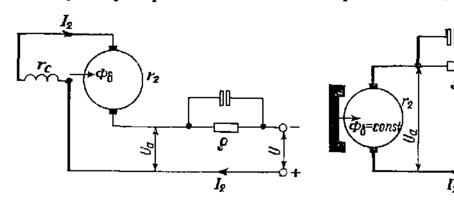


Рис. 1.21. Схема двигателя последовательного возбуждения с регулятором скорости

Рис. 1.22. Схема двигателя с возбуждением постоянными магнитами и регулятором скорости

ственном сопротивлении ее $r_ш$ скорость вращения якоря двигателя будет минимальной $n_{мин}$. Эта скорость получила название **собственной скорости вращения** двигателя, которая при номинальном напряжении на его зажимах обычно находится в следующих пределах:

$$0{,}8n_0 \leqslant n_{мин} < n_0, \qquad (1\text{-}19)$$

где n_0 — заданная стабилизируемая скорость вращения якоря, об/мин.

Выбор собственной скорости вращения двигателя $n_{мин}$, сопротивления параллельной обмотки возбуждения $r_ш$ и добавочного сопротивления ρ в этой цепи ниже производится из условия обеспечения постоянства заданной скорости вращения двигателя при указанных предельных режимах его работы в отношении изменения напряжения, нагрузки на валу и температуры нагрева.

В двигателях последовательного возбуждения (рис. 1.21) и с возбуждением постоянными магнитами (рис. 1.22) стабилизация скорости вращения осуществляется изменением напряжения на зажимах двигателя путем периодического шунтирования добавочного сопротивления в цепи якоря вибрирующими контактами центробежного регулятора (рис. 1.21). В этом случае эффективное до-

бавочное сопротивление в цепи якоря $\rho\tau_р$ автоматически изменяется при изменении режима работы двигателя за счет изменения величины относительной разомкнутости $\tau_р$ контактов регулятора. В предельных режимах работы двигателя эта величина здесь принимает следующие значения: $\tau_р = 1$ — при работе двигателя вхолостую, наибольшем напряжении на его зажимах $U_{макс}$ и максимальной температуре нагрева и $\tau_р \approx 0$ — при работе его с полной нагрузкой и наименьших значениях напряжения $U_{мин}$ и температуры нагрева. Как показывает анализ этого вопроса, величина добавочного сопротивления ρ в цепи якоря двигателя, обеспечивающего стабилизацию его скорости вращения при колебаниях питающего напряжения в пределах $U_{макс} = 1{,}1\ U$ и $U_{мин} = 0{,}9\ U$, при изменениях нагрузки на валу от нуля до полной и заданной температуре нагрева, составляет: для двигателей последовательного возбуждения (рис. 1.21):

$$\rho = \frac{1{,}1 - 0{,}9\zeta_0}{\beta_0} \frac{U}{I_2} + \frac{\zeta_0 - \beta_0}{\beta_0}(r_2 + r_c),\ \text{Ом}; \qquad (1\text{-}20)$$

для двигателей с возбуждением постоянными магнитами (рис. 1.22):

$$\rho = \frac{0{,}2}{\beta_0} \frac{U}{I_2} + \frac{1 - \beta_0}{\beta_0} r_2,\ \text{Ом}, \qquad (1\text{-}21)$$

где U — номинальное напряжение питания, В; I_2 — номинальный потребляемый якорем ток, А; r_2 — сопротивление обмотки якоря и щеточных контактов, Ом; r_c — сопротивление последовательной обмотки возбуждения, Ом; $\beta_0 = I_{20}/I_2$ — отношение тока холостого хода двигателя к номинальному току якоря; $\zeta_0 = \Phi_{\delta 0}/\Phi_\delta$ — отношение магнитных полей полюса в воздушном зазоре, создаваемых соответственно токами холостого хода и нагрузки якоря.

Если в цепи якоря двигателя последовательного возбуждения (рис. 1.21) зашунтировать добавочное сопротивление ρ, то при сопротивлении якоря r_2 и последовательной обмотки возбуждения r_c собственная скорость вращения якоря двигателя $n_{макс}$ будет больше стабилизируемой скорости n_0. Эта скорость при номинальном напряжении на зажимах двигателя обычно составляет:

$$n_{макс} \geqslant (1{,}1 \div 1{,}2)\, n_0,\ \text{об/мин}. \qquad (1\text{-}22)$$

Ниже дается определение основных размеров электродвигателей постоянного тока со стабилизированной скоростью вращения посредством центробежного вибрационного регулятора и расчет их обмоток возбуждения.

Основные размеры стабилизирующего электродвигателя

В случае малых двигателей постоянного тока параллельного возбуждения со стабилизованной скоростью вращения центробежным регулятором (рис. 1.20) диаметр их якоря при одинаковой полезной мощности на валу P_2 получается относительно большим,

чем рассмотренных в позиции 4 нестабилизируемых двигателей. Это объясняется тем, что для обеспечения необходимой точности стабилизации скорости вращения в заданных пределах при колебаниях напряжения источника питания от $U_{макс}$ до $U_{мин}$, изменения нагрузки на валу от 0 до 100% и широком изменении температуры окружающей среды магнитная система стабилизируемого двигателя параллельного возбуждения должна быть относительно ненасыщенной и омическое сопротивление обмотки якоря возможно малым.

70. Диаметр и расчетная длина якоря

Анализ данного вопроса показывает, что при одинаковой полезной мощности на валу P_2 и равной осевой длине якорей нестабилизируемого и стабилизируемого двигателей параллельного возбуждения внутренний диаметр полюсов последнего $D'_{п1}$ определяется следующим образом:

при соотношении потерь в обмотках и контактах щеток с общими потерями в двигателе $P_{м+щ} \approx \frac{1}{2} \Sigma P$:

$$D'_{п1} = D_{п1} \sqrt[3]{\frac{2\gamma_0}{(1+\eta)(1+i_{ш})}}, \text{ см},$$

при соотношении этих потерь $P_{м+щ} \approx \frac{2}{3} \Sigma P$:

$$D'_{п1} = D_{п1} \sqrt[3]{\frac{3\gamma_0}{(1+2\eta)(1+i_{ш})}}, \text{ см},$$

где $D_{п1}$ — внутренний диаметр полюсов нестабилизируемого двигателя, определяемый по уравнению позиции 4; η — к. п. д. нестабилизируемого двигателя для полезной мощности P_2 (рис. 1.1); $i_{ш} = I_{ш}/I = 0{,}1 \div 0{,}2$; $\gamma_0 = U_{макс}/U_{мин} = 1{,}225$ — при колебаниях напряжения в пределах $\pm$ 10% от номинального значения.

Расчетное значение внутреннего диаметра полюсов $D'_{п1}$ округляется до ближайшего стандартного числа согласно ГОСТ 6636—69 (приложение VIII); при этом окончательный диаметр якоря $D_{н2} = D'_{п1} - 2\delta$, где δ — длина воздушного зазора между полюсами и якорем по позиции 33, а длина пакета якоря l_0 принимается равной значению ее в позиции 4.

Далее производится определение других данных двигателя по позициям 5—46 и затем расчет обмотки возбуждения его с учетом стабилизации скорости вращения центробежным регулятором.

Расчет обмотки возбуждения

ДВИГАТЕЛИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ (Рис. 1.20)

71. Выбор собственной скорости вращения двигателя

Величина собственной скорости вращения якоря двигателя выбирается из уравнения (1-19).

72. Наибольшее и наименьшее значения полезных магнитных полей полюса в воздушном зазоре при указанных выше предельных режимах работы двигателя

$$\Phi_{\delta\,\text{макс}} = \frac{1{,}1U - I_{20}r_2 - \Delta U_{\text{щ}}\dfrac{I_{20}}{I_2}}{c_E n_{\text{мин}}}, \text{ Вб};$$

$$\Phi_{\delta\,\text{мин}} = \frac{0{,}9U - I_2 r_2 - \Delta U_{\text{щ}}}{c_E n_0}, \text{ Вб},$$

где $I_{20}/I_2 = 0{,}12 \div 0{,}20$ — отношение тока холостого двигателя к номинальному току якоря; $c_E = \frac{p}{60}\frac{N_2}{a}$; $a = 1$; U и n_0 берутся по заданию; I_2 — из позиции 2; p — из позиции 6; N_2 — из позиции 12; r_2 — из позиции 23; $\Delta U_{\text{щ}}$ — из табл. 1.1 позиции 28; $n_{\text{мин}}$ — из позиции 71.

73. Наибольшая и наименьшая м. д. с. возбуждения на пару полюсов при указанных выше предельных режимах работы двигателя

Наибольшая $F_{\text{ш. макс}}$ и наименьшая $F_{\text{ш. мин}}$ м. д. с. возбуждения двигателя на пару полюсов определяются по кривой намагничивания двигателя $\Phi_\delta = f(F)$ (рис. 1.15) с помощью магнитных полей $\Phi_{\delta\,\text{макс}}$ и $\Phi_{\delta\,\text{мин}}$, полученных в позиции 72.

74. Сечение и диаметр провода обмотки возбуждения

Сечение провода обмотки возбуждения в этом случае определяется по формуле

$$q_1 = k_\Theta \frac{pF_{\text{ш. макс}} l_{\text{ср}\,1}}{5700 \cdot 1{,}1U}, \text{ мм}^2,$$

где U берется по заданию; p — из позиции 6; k_Θ — как в позиции 50; $F_{\text{ш. макс}}$ — из позиции 73; $l_{\text{ср}1}$ — средняя длина витка параллельной обмотки возбуждения в сантиметрах, определяемая, как указано в позиции 50.

По ГОСТ из приложения I окончательно выбираются подходящие сечение и диаметр провода:

$$q_1 = \ldots; \quad d_1/d_{1\text{и}} = \ldots$$

75. Максимальный ток возбуждения двигателя

$$I_{\text{ш. макс}} = j_{1\,\text{макс}} q_1, \text{ А},$$

где $j_{1\text{макс}}$ — максимальная плотность тока в параллельной обмотке возбуждения, принимается на 15—20% больше выбираемой по кривым рис. 1.16 в зависимости от режима работы и вращающего момента двигателя, q_1 берется из позиции 74.

76. Число витков параллельной обмотки возбуждения на полюс

$$W_{\text{ш}} = \frac{F_{\text{ш. макс}}}{2I_{\text{ш. макс}}},$$

где $F_{\text{ш. макс}}$ берется из позиции 73; $I_{\text{ш. макс}}$ — из позиции 75.

77. Размещение обмотки возбуждения на сердечнике полюса

Обмотка размещается так же, как указано в позициях 53 и 54.

78. Сопротивление параллельной обмотки возбуждения в нагретом состоянии при ϑ°С

$$r_ш = k_\Theta \frac{2pW_ш l_{ср\,1}}{5700 q_1}, \text{ Ом},$$

где $2p$ берется из позиции 6; k_Θ — как в позиции 50; q_1 — из позиции 74; $W_ш$ — из позиции 76; $l_{ср1}$ уточняется после размещения обмотки возбуждения на сердечнике полюса.

Полученное здесь сопротивление параллельной обмотки возбуждения должно при повышенном напряжении на зажимах двигателя определять значение тока возбуждения согласно позиции 75:

$$I_{ш.\,макс} = \frac{1{,}1U}{r_ш}, \text{ А},$$

где U берется по заданию.

79. Минимальный ток возбуждения двигателя

$$I_{ш.\,мин} = \frac{F_{ш.\,мин}}{2W_ш}, \text{ А},$$

где $F_{ш.\,мин}$ берется из позиции 73; $W_ш$ — из позиции 76.

80. Наименьшая величина добавочного сопротивления в цепи возбуждения

$$\rho = \frac{0{,}9U}{I_{ш.\,мин}} - r_{ш0}, \text{ Ом},$$

где U берется по заданию, $I_{ш.\,мин}$ — из позиции 79; $r_{ш0} = r_ш / k_\Theta$ — сопротивление обмотки возбуждения в холодном состоянии при 20° С, при этом k_Θ — как в позиции 50; $r_ш$ — из позиции 78.

81. Номинальный ток возбуждения двигателя

$$I_ш = \frac{F_ш}{2W_ш}, \text{ А},$$

где $W_ш$ берется из позиции 76, $F_ш$ определяется по кривой намагничивания двигателя $\Phi_\delta = f(F)$ (рис. 1.15) с помощью номинального полезного магнитного поля полюса Φ_δ в воздушном зазоре, полученного в позиции 8.

82. Среднее эффективное сопротивление цепи возбуждения двигателя при установившемся номинальном режиме работы [уравнения (1-17) и (1-18)]

$$r_{ш.\,эф} = r_ш + \rho\tau_р = \frac{U}{I_ш}, \text{ Ом},$$

где U берется по заданию; $I_ш$ — из позиции 81.

83. Относительная разомкнутость контактов центробежного вибрационного регулятора скорости вращения при установившемся номинальном режиме работы двигателя

$$\tau_p = \frac{r_{ш.\,эф} - r_{ш}}{\rho},$$

где $r_{ш.\,эф}$ берется из позиции 82; $r_ш$ — из позиции 78; ρ — из позиции 80.

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Определение числа витков и сечения провода последовательной обмотки возбуждения электродвигателя со стабилизацией скорости вращения центробежным регулятором в цепи якоря (рис. 1.21) производится так же, как обычного малого двигателя последовательного возбуждения по формулам позиций 47—54. Однако для получения в соответствии с уравнением (1-22) собственной скорости вращения стабилизируемого двигателя $n_{макс}$ при зашунтированном добавочном сопротивлении ρ в цепи якоря величина его э. д. с. при нагрузке по позиции 52 должна быть на 10—20% больше значения ее в позиции 2. Это можно обеспечить надлежащим выбором сопротивления r_c последовательной обмотки возбуждения. Тогда необходимая величина добавочного сопротивления в цепи якоря двигателя, обеспечивающая стабилизацию его скорости вращения, определится из уравнения (1-20).

После этого по формулам позиций 60—65 определяются потери и к. п. д. двигателя со стабилизацией скорости вращения.

1-10. РАСЧЕТ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Исполнительные управляемые двигатели постоянного тока в настоящее время широко используются в различных схемах автоматической отработки. В таком режиме работы эти двигатели обладают устойчивой механической характеристикой, линейностью регулировочной характеристики и достаточным быстродействием.

Принципиально управление исполнительным электродвигателем постоянного тока может осуществляться как со стороны цепи якоря, так и цепи возбуждения. Как показывают теоретические исследования и опыт, преимуществом обладает способ управления двигателем со стороны цепи якоря. Поэтому в настоящее время исполнительные двигатели постоянного тока малой мощности обычно имеют независимое возбуждение или же возбуждение их постоянными магнитами и управляются со стороны цепи якоря.

На рис. 1.23 представлена принципиальная схема такого двигателя. В этой схеме обмотка возбуждения двигателя включается на неизменное напряжение источника постоянного тока. При установившейся температуре нагрева обмотки возбуждения и пренебрежении влиянием реакции якоря эта обмотка будет создавать неиз-

менное магнитное поле Φ_δ в воздушном зазоре двигателя. При включении управляющего напряжения $U_у$ на зажимы якоря (рис. 1.23) в нем потечет ток I_2. Взаимодействие этого тока с магнитным полем в воздушном зазоре Φ_δ будет создавать электромагнитный вращающий момент M, величина которого составляет [12]:

$$M = \frac{c_м c_ф U_в^2}{r_2}(\alpha - c_E c_ф n), \text{ Н·см}, \quad (1\text{-}23)$$

где $U_в$ — напряжение на зажимах обмотки возбуждения, В; n — скорость вращения якоря двигателя, об/мин; r_2 — омическое сопротивление якоря с учетом переходного сопротивления контактов щеток и коллектора, Ом; $\alpha = U_у/U_в$ — коэффициент управляющего сигнала; $c_ф = \Phi_\delta/U_в$ — постоянный коэффициент, Вб/В; $c_м = \frac{N_2}{2\pi}\frac{p}{a}\cdot 10^2$; $c_E = \frac{N_2}{60}\frac{p}{a}$ — постоянные коэффициенты; при этом N_2 — число проводников обмотки якоря; $a = 1$; p — число пар полюсов двигателя.

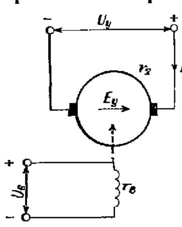


Рис. 1.23. Схема исполнительного двигателя постоянного тока с управлением со стороны цепи якоря

Максимальный пусковой момент исполнительного двигателя при неподвижном якоре, когда скорость вращения $n = 0$, и коэффициенте управляющего сигнала $\alpha = 1$ из уравнения (1-23) будет

$$M_{пт} = \frac{c_м c_ф U_в^2}{r_2}, \text{ Н·см} \quad (1\text{-}24)$$

и механические характеристики этого двигателя $m = f(q)$ в относительных единицах при разных коэффициентах сигнала α будут

$$m = \frac{M}{M_{пт}} = \alpha - q, \quad (1\text{-}25)$$

где $q = n/n_0$ — относительная скорость вращения якоря; $n_0 = 1/(c_E c_ф)$ — скорость вращения якоря, об/мин, при теоретическом холостом ходе двигателя, когда противо-э. д. с. якоря $E_у = U_у = U_в$.

Регулировочные характеристики исполнительного двигателя $q = f(\alpha)$ при разных значениях момента m из уравнения (1-25) имеют вид:

$$q = \alpha - m. \quad (1\text{-}26)$$

Наконец, полная механическая мощность этого двигателя в относительных единицах с учетом уравнения (1-25)

$$p_2 = mq = \alpha q - q^2. \quad (1\text{-}27)$$

На рис. 1.24 и 1.25 представлены по уравнениям (1-25) и (1-26) механические и регулировочные характеристики, а на рис. 1.26 даны

по уравнению (1-27) кривые полной механической мощности исполнительного двигателя постоянного тока.

Расчет управляемых исполнительных двигателей постоянного тока малой мощности производится, так же как и рассмотренных выше обычных малых электродвигателей параллельного возбуждения, по формулам позиций 1—44 и 55—65.

При определении внутреннего диаметра полюсов, а также диаметра и длины пакета якоря исполнительного двигателя по формулам позиции 4 нужно выбирать отношение $\xi = l_0/D_{п1}$ в пределах $\xi = 1{,}4 \div 2{,}4$ для получения удлиненного пакета якоря l_0 с ограниченным диаметром $D_{н2}$ в целях уменьшения его момента инерции $J = 8\,D_{н2}^4 l_0 \cdot 10^{-4}$, кг·см².

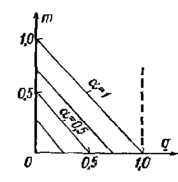


Рис. 1.24. Механические характеристики исполнительного двигателя

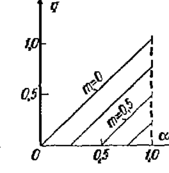


Рис. 1.25. Регулировочные характеристики исполнительного двигателя

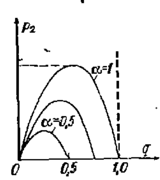


Рис. 1.26. Кривые зависимости полной механической мощности исполнительного двигателя от скорости вращения

Электромеханическая постоянная времени $T_м$ исполнительного двигателя, наименьшая величина которой характеризует его быстродействие, может быть определена по уравнению [12]

$$T_М = \frac{J\omega \cdot 10^{-2}}{M_{пт}}, \text{ с}, \tag{1-28}$$

где $\omega = 2\pi n/60$ — установившаяся угловая скорость вращения якоря, рад/с; $M_{пт}$ — максимальный пусковой момент двигателя по уравнению (1-24), Н·см.

После этого по уравнениям (1-25), (1-26) и (1-27) строятся механические и регулировочные характеристики и кривые полной механической мощности исполнительного двигателя (рис. 1.24, 1.25 и 1.26).

1-11. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РЕВЕРСИВНОЙ УСТАНОВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В некоторых областях техники встречаются реверсивные установки мощностью до нескольких десятков или сотен ватт с относительно большим моментом инерции на валу исполнительного элек-

тродвигателя и с частотой реверса порядка 0,5 — 5 Гц или несколько более. Обычно это установки постоянного тока (рис. 1.27). Питание реверсивного исполнительного двигателя *1* такой установки может осуществляться или от сети постоянного тока с релейным способом реверсирования напряжения на зажимах якоря двигателя или же от электромашинного усилителя с поперечным полем соизмеримой мощности с реверсированием выходного напряжения током управления. В обоих случаях исполнительный двигатель имеет постоянное независимое возбуждение (рис. 1.27) или же возбуждение постоянными магнитами.

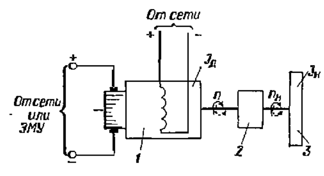


Рис. 1.27. Схема реверсивной установки с двигателем постоянного тока

При реверсивной работе исполнительного двигателя этой установки нагрузка на его валу *3* обычно совершает относительно его оси через редуктор *2* колебательные движения с указанной частотой и амплитудой размаха в пределах некоторого заданного сектора с углом α_0 (рис. 1.28). При этом характер колебания нагрузки за полупериод определяется видом заданного графика работы установки. Эти графики могут быть приблизительно трапецеидального или же синусоидального характера (рис. 1.28 и 1.29). За полупериод реверса двигатель после разгона достигает своей установившейся скорости вращения, а затем происходит его торможение. Нагрузка же за этот полупериод описывает только часть дуги окружности, соответствующую углу α_0. Ввиду этого механическая связь вала исполнительного двигателя

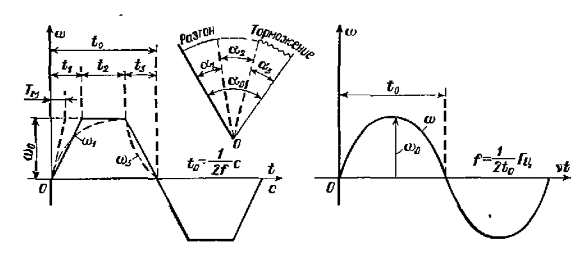


Рис. 1.28. Трапецеидальный график изменения скорости вращения нагрузки на валу двигателя

Рис. 1.29. Синусоидальный график изменения скорости вращения нагрузки на валу двигателя

с валом нагрузки при таком режиме работы осуществляется через редуктор с определенным передаточным числом. В этом случае основные размеры двигателя данной установки зависят от ряда факторов, а именно: вида графика изменения скорости вращения вала нагрузки, величины ее момента инерции $J_н$, угла размаха колебания α_0 и др.

Так, например, в случае теоретически трапецеидального графика изменения скорости вращения вала нагрузки (рис. 1.28) разгон двигателя до установившейся скорости за время t_1 в действительности будет происходить по экспоненциальному закону (штриховая кривая) с электромеханической постоянной времени

$$T_М = \frac{J\omega \cdot 10^{-2}}{M_п} \leqslant \frac{1}{3} t_1, \text{ с}, \qquad (1\text{-}29)$$

где $J = J_д + J_н'$ — общий момент инерции якоря двигателя и нагрузки, приведенный к валу двигателя, кг·см²; $J_д$ — момент инерции якоря, кг·см²; $J_н' = J_н \frac{1}{k^2}$ — то же нагрузки, приведенный к валу двигателя, кг·см²; k — передаточное число редуктора; $\omega = k\omega_0$ — установившаяся угловая скорость вращения двигателя, рад/с; ω_0 — наибольшая угловая скорость вращения вала нагрузки (рис. 1.28), рад/с; t_1 — время разгона системы, с; $M_п$ — пусковой момент двигателя, Н·см.

Уравнения угловых скоростей вращения на участках разгона и торможения за полупериод $t_0 = \frac{1}{2f}$, с по штриховому графику рис. 1.28 будут:

$$\omega_1 = \omega_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_М}}\right); \quad \omega_2 = \omega_0 e^{-\frac{t}{T_М}}. \qquad (1\text{-}30)$$

В случае синусоидального графика рис. 1.29 эта скорость за период $2t_0$ будет

$$\omega = \omega_0 \sin \nu t. \qquad (1\text{-}31)$$

Требуемый от исполнительного двигателя рассматриваемой установки пусковой момент численно слагается из следующих составляющих

$$M_п = M_0 + M_н + M_J, \text{ Н·см}, \qquad (1\text{-}32)$$

где M_0 — тормозящий момент механических и магнитных потерь двигателя, Н·см; $M_н$ — статический нагрузочный момент, приведенный к валу двигателя, Н·см; M_J — средний момент ускорения при разгоне системы, Н·см.

Как показывает теоретический анализ процессов пуска исполнительного двигателя в данной системе, для получения наименьшей

величины момента ускорения наивыгоднейшее значение передаточного числа редуктора должно быть [10]:

$$k=\sqrt{\frac{J_{н}}{J_{д}}}, \qquad (1\text{-}33)$$

т. е. $J_{д}=J_{н}\frac{1}{k^2}=J'_{н}$, а величина этого момента будет: а) при трапецендальном графике (рис. 1.28)

$$M_J=\frac{2\omega_0\cdot 10^{-2}}{T_{м}}\sqrt{J_{д}J_{н}},\ \text{Н·см}, \qquad (1\text{-}34)$$

где $\omega_0=\frac{2\alpha_0 f}{1-\xi_з}$; $\zeta_з=\frac{t_1}{t_0}$; α_0 — угол сектора колебания нагрузки (рис. 1.28), рад; f — частота реверса двигателя, Гц;

б) при синусоидальном графике (рис. 1.29)

$$M_J=2\omega_0\nu\cdot 10^{-2}\sqrt{J_{д}J_{н}},\ \text{Н·см}, \qquad (1\text{-}35)$$

при этом $\omega_0=\pi\alpha_0 f$; $\nu=2\pi f=\frac{\pi}{t_0}$.

В соответствии с этим средняя мощность ускорения за время разгона системы будет [10]:

а) при трапецеидальном графике (рис. 1.28):

$$P_J=\frac{0,8}{\zeta_1(1-\zeta_з)^2}J_{н}\alpha_0^2 f^3\frac{10^3}{g},\ \text{Вт}, \qquad (1\text{-}36)$$

где $\zeta_1=\frac{t_1}{t_0}\approx\zeta_з$; $t_0=\frac{1}{2f}$, с; $g=981$ см/с^2;

б) при синусоидальном графике (рис. 1.29):

$$P_J=4J_{н}\alpha_0^2 f^3\frac{10^3}{g},\ \text{Вт}, \qquad (1\text{-}37)$$

при этом $J_{н}$ — момент инерции нагрузки на выходном валу редуктора, кг·см^2.

Для определения основных размеров и других параметров реверсивных исполнительных электродвигателей постоянного тока исходными данными являются следующие:

напряжение питания U, В;

мощность статической нагрузки на валу двигателя P_2, Вт;

момент инерции нагрузки $J_{н}$, кг·см^2;

частота реверса системы f, Гц;

угол размаха колебания нагрузки α_0, рад;

вид графика колебания нагрузки: трапецеидальный, синусоидальный.

Так как исполнительный электродвигатель реверсивной установки при частоте реверса порядка 0,5 — 5 Гц практически работает в непрерывном неустановившемся режиме, то для определе-

ния основных размеров его нужно в величину расчетной или габаритной мощности двигателя включать также и среднюю мощность ускорения системы. В этом случае расчетная мощность реверсивного исполнительного двигателя будет

$$P_a = P'_a + P_J = \zeta P_J, \text{ Вт}, \qquad (1\text{-}38)$$

где $P'_a = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_2$ — часть расчетной мощности двигателя, соответствующая мощности статической нагрузки на его валу P_2, Вт; P_J — средняя мощность ускорения системы по уравнению (1-36) или (1-37), Вт; η — к. п. д. двигателя, соответствующий мощности P_2 и определяемый по кривым рис. 1.1; $\zeta = 1 + \frac{P'_a}{P_J}$.

В соответствии с исходными данными и учетом уравнения (1-38) расчет реверсивного исполнительного двигателя постоянного тока может быть произведен в следующем порядке.

84. Определяется часть расчетной мощности двигателя, соответствующая мощности статической нагрузки на валу

$$P'_a = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_2, \text{ Вт},$$

где P_2 берется по заданию; η — по кривым рис. 1.1 по заданной мощности P_2.

85. Наименьшая мощность ускорения системы

P_J определяется по уравнению (1-36) — при трапецеидальном графике (рис. 1.28) или по уравнению (1-37) — при синусоидальном графике (рис. 1.29).

86. Полная расчетная или габаритная мощность реверсивного исполнительного двигателя

P_a рассчитывается по уравнению (1-38):

87. Диаметр и длина пакета якоря

Если воспользоваться формулой машинной постоянной и выражением для расчетной мощности двигателя через среднюю мощность ускорения системы, то после соответствующих преобразований получаются следующие формулы для определения внутреннего диаметра полюсов $D_{п1}$ и длины пакета якоря l_0 реверсивного исполнительного двигателя [10]:

а) при трапецеидальном графике (рис. 1.28):

$$D_{п1} = \frac{1{,}4\zeta^2 J_н C^2 \alpha_0^2 f^4 \cdot 10^{-6}}{g\xi\zeta_1^2 (1-\zeta_3)^2}, \text{ см}; \quad l_0 = \xi D_{п1}, \text{ см};$$

б) при синусоидальном графике (рис. 1.29):

$$D_{п1} = \frac{14\zeta^2 J_н C^2 \alpha_0^2 f^4 \cdot 10^{-6}}{g\xi}, \text{ см}; \; l_0 = \xi D_{п1}, \text{ см},$$

где $J_н$, α_0 и f берутся по заданию; $\xi = 1,4 \div 2,0$; ζ — из позиции 86; ζ_1 и ζ_3 — в соответствии с уравнением (1-36); $g = 981$ см/с^2.

Машинная постоянная

$$C = \frac{6 \cdot 10^4}{\alpha B_\delta A_2},$$

при этом $\alpha = 0,6 \div 0,7$; $B_\delta = 0,3 \div 0,4$ Т; $A_2 = 100 \div 120$ А/см — при расчетных мощностях двигателя $P_a \leqslant 200$ Вт; $B_\delta = 0,4 \div 0,5$ Т; $A_2 = 120 \div 180$ А/см — при расчетных мощностях его $200 < P_a < 1000$ Вт.

Расчетные значения внутреннего диаметра полюсов $D_{п1}$ и длины пакета якоря l_0 обычно округляются до ближайших стандартных чисел согласно ГОСТ 6636—69 (приложение VIII); при этом окончательный диаметр якоря $D_{н2} = D_{п1} - 2\delta$, где δ — длина воздушного зазора между полюсами и якорем по позиции 33.

88. Момент инерции якоря двигателя

$$J_д \approx 8 D_{н2}^4 l_0 \cdot 10^{-4}, \text{ кг} \cdot \text{см}^2,$$

где $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 87.

89. Наивыгоднейшее значение передаточного числа редуктора

Определяется по уравнению (1-33), где $J_н$ берется по заданию: $J_д$ — из позиции 88.

90. Максимальная угловая скорость вращения вала нагрузки

а. При трапецеидальном графике (рис. 1.28):

$$\omega_0 = \frac{2\alpha_0 f}{1 - \zeta_3}, \text{ рад/с},$$

б. При синусоидальном графике (рис. 1.29):

$$\omega_0 = \pi \alpha_0 f, \text{ рад/с},$$

где α_0 и f берутся по заданию; ζ_3 — в соответствии с уравнением (1-34).

91. Установившаяся рабочая скорость вращения реверсивного исполнительного двигателя

$$n = k \frac{30\omega_0}{\pi}, \text{ об/мин},$$

где k берется из позиции 89; ω_0 — из позиции 90.

После определения основных размеров $D_{\text{п}2}$, l_0 и скорости вращения n реверсивного исполнительного электродвигателя производится расчет других его элементов и параметров изложенным выше методом по формулам позиций 5—46; 55—65.

Пример расчета электродвигателя постоянного тока малой мощности

Задание

Полезная мощность на валу $P_2 = 40$ Вт;
напряжение на зажимах $U = 110$ В;
скорость вращения $n = 4000$ об/мин;
способ возбуждения — последовательное;
режим работы — продолжительный;
тип исполнения — закрытое.

Основные размеры электродвигателя

1. Расчетная мощность

$$P_a = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_2 = \frac{1+2\cdot 0{,}54}{3\cdot 0{,}54}\cdot 40 = 51{,}4 \text{ Вт},$$

где согласно кривой на рис. 1.1 $P_2 = 40$ Вт; $\eta = 0{,}54$.

2. Ток и э. д. с. якоря:

$$I_2 = \frac{P_2}{\eta U} = \frac{40}{0{,}54\cdot 110} \approx 0{,}67 \text{ А};$$

$$E = \frac{1+2\eta}{3} U = \frac{1+2\cdot 0{,}54}{3}\cdot 110 = 76 \text{ В}.$$

3. Машинная постоянная

$$C = \frac{6\cdot 10^4}{\alpha B_\delta A_2} = \frac{6\cdot 10^4}{0{,}67\cdot 0{,}35\cdot 75} = 3420,$$

где принято $\alpha = 0{,}67$ и согласно кривым рис. 1.2 $\frac{P_2}{n} = 10\cdot 10^{-3}$:

$$B_\delta = 0{,}35 \text{ Т}; \quad A_2 = 75 \text{ А/см}.$$

4. Внутренний диаметр полюсов и расчетная длина пакета якоря:

$$D_{\text{п}1} = \sqrt[3]{\frac{CP_a}{\xi n}} = \sqrt[3]{\frac{3420\cdot 51{,}4}{1\cdot 4000}} \approx 3{,}5 \text{ см};$$

$$l_0 = \xi D_{\text{п}1} = 1\cdot 3{,}5 = 3{,}5 \text{ см},$$

где $\xi = 1{,}0$.

Окончательно по ГОСТ 6636—69 (приложение VIII) принимаем:

$$D_{\text{п}1} = 36 \text{ мм}; \quad D_{\text{п}2} = 36 - 2\cdot 0{,}25 = 35{,}5 \text{ мм}; \quad l_0 = 36 \text{ мм}; \quad \delta = 0{,}25 \text{ мм}.$$

Материал якоря — листовая электротехническая сталь марки Э11 толщиной 0,5 мм (ГОСТ 802—58, приложение IV)

5. Окружная скорость вращения якоря

$$v_2 = \frac{\pi D_{\text{п}2} n}{60}\cdot 10^{-2} = \frac{\pi\cdot 3{,}55\cdot 4000}{60}\cdot 10^{-2} = 7{,}43 \text{м/с}.$$

6. Полюсный шаг и расчетная полюсная дуга

$$\tau_2 = \frac{\pi D_{н2}}{2p} = \frac{\pi \cdot 3{,}55}{2} \approx 5{,}6 \text{ см};$$

$$b_0 = \alpha\tau_2 = 0{,}67 \cdot 5{,}6 \approx 3{,}8 \text{ см},$$

где принято $2p = 2$.

Действительная полюсная дуга

$$b = 1{,}02 b_0 = 1{,}02 \cdot 3{,}8 \approx 3{,}9 \text{ см}.$$

7. Частота перемагничивания якоря

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 4000}{60} \approx 67 \text{ Гц}.$$

Обмотка якоря

8. Полезное магнитное поле полюса в воздушном зазоре при нагрузке двигателя

$$\Phi_\delta = B_\delta b_0 l_0 \cdot 10^{-4} = 0{,}35 \cdot 3{,}8 \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-4} = 0{,}48 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

9. Число проводников обмотки якоря

$$N_2 = \frac{60aE}{pn\Phi_\delta} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 76}{1 \cdot 4000 \cdot 0{,}48 \cdot 10^{-3}} = 2375.$$

10. Число пазов якоря

$$z_2 = (3 \div 4)\, D_{н2} = (3 \div 4) \cdot 3{,}55 = 11 \div 14;$$

принимаем $z_2 = 13$.

11. Число коллекторных пластин принимаем:

$$K = 2z_2 = 2 \cdot 13 = 26.$$

12. Число витков в секции обмотки якоря

$$w'_{c2} = \frac{N_2}{2K} = \frac{2340}{2 \cdot 26} = 45,$$

где окончательно принято $N_2 = 2340$.

13. Число проводников в пазу якоря

$$N_{п2} = \frac{N_2}{z_2} = \frac{2340}{13} = 180.$$

14. Шаги обмотки якоря по секциям и коллектору

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon = \frac{26}{2} - 0 = 13;$$

$$y_2 = y_1 - 1 = 13 - 1 = 12; \quad y = 1; \quad y_к = 1.$$

После этого вычерчивается в развернутом виде схема обмотки якоря.

15. Окончательная величина линейной нагрузки якоря

$$A_2 = \frac{N_2 I_2}{2\pi D_{н2}} = \frac{2340 \cdot 0{,}68}{2\pi \cdot 3{,}55} \approx 71 \text{ А/см},$$

что близко соответствует ранее выбранному значению.

Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

16. Предварительный выбор плотности тока в обмотке якоря. Удельная тепловая загрузка якоря при продолжительном режиме работы двигателя по уравнению (1-1а):

$$q = \alpha' \Delta\theta_m (1 + 0{,}1 \cdot v_2) = 0{,}12\,(1 + 0{,}1 \cdot 7{,}43) \approx 0{,}21 \text{ Вт/см}^2.$$

Допустимая плотность тока в обмотке якоря в среднем:

$$j_2' = \frac{1700q}{A_2} = \frac{1700 \cdot 0{,}21}{71} = 5{,}0 \text{ А/мм}^2.$$

Как указано в позиции 16, отклонения от значения j_2' могут составлять $\pm 15\%$.

17. Сечение и диаметр провода обмотки якоря

$$q_2' = \frac{I_2}{2j_2'} = \frac{0{,}68}{2 \cdot 5{,}0} = 0{,}068 \text{ мм}^2.$$

По ГОСТ 6324—52 (приложение I) окончательно принимаем:

$$q_2 = 0{,}0572 \text{ мм}^2; \quad d_2/d_{2и} = 0{,}27/0{,}37 \text{ мм};$$

марка провода ПЭЛШО.

18. Окончательная плотность тока в обмотке якоря

$$j_2 = \frac{I_2}{2q_2} = \frac{0{,}68}{2 \cdot 0{,}0572} = 5{,}95 \text{ А/мм}^2.$$

19. Площадь сечения паза якоря:

а) площадь паза якоря, занимаемая изолированными проводниками,

$$Q_{п.\,п} = \frac{N_{п2} d_{2и}^2}{f_0} = \frac{180 \cdot 0{,}37^2}{0{,}74} \approx 33 \text{ мм}^2,$$

где $f_0 = 0{,}74$.

б) площадь паза, занимаемая пазовой изоляцией,

$$Q_{п.\,и} = \delta_и \Pi = 0{,}25 \cdot 22 \approx 6 \text{ мм}^2,$$

где периметр паза $\Pi = 0{,}62\, D_{н2} = 0{,}62 \cdot 35{,}5 = 22$ мм.

Толщина пазовой изоляции $\delta_и = 0{,}25$ мм состоит из лакоткани ЛШС — 0,10 мм (ГОСТ 2214—60, приложение II) и электрокартона ЭВ — 0,15 мм (ГОСТ 2824—60, приложение III).

в) площадь паза, занимаемая клином

$$Q_{п.\,к} = b_{кл} h_{кл} = 4 \cdot 0{,}8 \approx 3 \text{ мм}^2,$$

где принято $b_{кл} = 4$ мм; $h_{кл} = 0{,}8$ мм.

г) общая требуемая площадь сечения паза якоря

$$Q_п = Q_{п.\,п} + Q_{п.\,и} + Q_{п.\,к} = 33 + 6 + 3 = 42 \text{ мм}^2.$$

20. Коэффициент заполнения паза изолированным проводом

$$k_{п.\,и} = \frac{N_{п2} q_{2и}}{Q_п} = \frac{180 \cdot 0{,}107}{42} \approx 0{,}46,$$

что допустимо.

21. Размеры паза и зубцов якоря. Ввиду того, что потребная площадь паза по позиции 19 получилась относительно большой, то при ограниченном

диаметре якоря здесь целесообразно выбрать трапецеидальные пазы с одинаковой толщиной зубца по его высоте (рис. 1, 3б). Минимальная толщина зубца будет

$$b''_{з2} = \frac{B_\delta t_2}{0{,}93 B_{з2 макс}} = \frac{0{,}35 \cdot 0{,}86}{0{,}93 \cdot 1{,}6} \approx 0{,}20 \text{ см},$$

где зубцовый шаг якоря

$$t_2 = \frac{\pi D_{н2}}{z_2} = \frac{\pi \cdot 3{,}55}{13} \approx 0{,}86 \text{ см}.$$

Тогда после вычерчивания в масштабе паза согласно рис. 1.9 размеры его получаются:

$$h_{п2} = 10{,}0 \text{ мм}; \quad b'_{п2} = 5{,}8 \text{ мм}; \quad b''_{п2} = 2{,}2 \text{ мм}.$$

Ширину прорези паза примем:

$$a_п = 4{,}3 d_{2и} = 4{,}3 \cdot 0{,}37 \approx 1{,}6 \text{ мм};$$

размеры зубца (рис. 1.3, б)

$$b'_{з2} = t_2 - a_п = 0{,}86 - 0{,}16 = 0{,}70 \text{ см}; \quad b''_{з2} = 0{,}20 \text{ см}.$$

22. Средняя длина одного проводника обмотки якоря

$$l_{ср2} = l_c + 1{,}2 \cdot D_{н2} = 3{,}6 + 1{,}2 \cdot 3{,}55 \approx 7{,}9 \text{ см}.$$

23. Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии при 75° С

$$r_2 = 1{,}22 \frac{N_2 l_{ср2}}{5700 4 q_2} = 1{,}22 \frac{2340 \cdot 7{,}9}{5700 \cdot 4 \cdot 0{,}0572} = 17{,}3 \text{ Ом}.$$

24. Падение напряжения в обмотке якоря

$$\Delta U_2 = I_2 r_2 = 0{,}68 \cdot 17{,}3 \approx 11{,}7 \text{ В},$$

что составляет

$$\frac{12}{110} \cdot 100 = 11\%.$$

Коллектор и щетки

25. Предварительная величина диаметра коллектора

$$D'_к = (0{,}5 \div 0{,}9)\, D_{н2} = 0{,}7 \cdot 35{,}5 = 25 \text{ мм}.$$

26. Ширина коллекторной пластины

$$t'_к = \frac{\pi D'_к}{K} = \frac{\pi \cdot 25}{26} = 3{,}0 \text{ мм};$$

примем $\beta_к = 2{,}8$ мм; $\beta_и = 0{,}6$ мм; окончательное коллекторное деление будет $t_к = \beta_к + \beta_и = 2{,}8 + 0{,}6 = 3{,}4$ мм.

27. Окончательный диаметр коллектора и окружная скорость его

$$D_к = \frac{K t_к}{\pi} = \frac{26 \cdot 0{,}34}{\pi} = 2{,}8 \text{ см};$$

$$v_к = \frac{\pi D_к n}{60} \cdot 10^{-2} = \frac{\pi \cdot 2{,}8 \cdot 4000}{60} \cdot 10^{-2} = 5{,}85 \text{ м/с}.$$

28. Сорт щеток и плотность тока под щетками. Так как проектируемый двигатель высоковольтный, то можно принять сорт щеток марки ЭГ-8; тогда согласно табл. 1.1 данные этих щеток:

$$j'_щ = 10 \text{ А/см}^2;\ \Delta U_щ = 2{,}4 \text{ В};\ \mu = 0{,}25;\ p_щ = 2{,}3 \text{ Н/см}^2\ (0{,}25 \text{ кг/см}^2).$$

29. Площадь сечения щетки и ее размеры

$$S'_щ = \frac{I_2}{pj'_щ} = \frac{0{,}68}{1\cdot 10} \approx 0{,}07 \text{ см}^2;$$

примем

$$b_щ = (1 \div 3)\,\beta_к = 1{,}14\cdot 2{,}8 = 3{,}2 \text{ мм};\quad a_щ = 4 \text{ мм (ГОСТ 12232-71)},$$

тогда окончательно:

$$S_щ = 0{,}32\cdot 0{,}4 = 0{,}13 \text{ см}^2;$$

$$h_щ = (1{,}5 \div 2{,}0)\,a_щ = 2\cdot 4 = 8 \text{ мм};$$

что соответствует ГОСТ 12232—71.

30. Окончательная плотность тока под щетками

$$j_щ = \frac{I_2}{pS_щ} = \frac{0{,}68}{1\cdot 0{,}13} = 5{,}2 \text{ А/см}^2.$$

31. Длина коллектора

$$l'_к = (1{,}5 \div 2{,}0)\,a_щ = 2\cdot 4 = 8 \text{ мм};$$

$$l_к = l'_к + (3 \div 5)\,d_2 = 8 + 5\cdot 0{,}27 \approx 9{,}4 \text{ мм}.$$

примем $l_к$ равной 9,5 мм.

32. Проверка коммутации. Ширина коммутационной зоны

$$b_к = b'_щ + \left[u_к + \left|\frac{K}{2p} - y_1\right| - \frac{a}{p}\right] t'_к =$$

$$= 0{,}41 + \left[2 + \left|\frac{26}{2} - 13\right| - \frac{1}{1}\right]\cdot 0{,}43 = 0{,}84 \text{ см},$$

что вполне допустимо, так как

$$b_к < 0{,}8\,(\tau_2 - b_0) = 0{,}8\,(5{,}6 - 3{,}8) = 1{,}44 \text{ см};$$

при этом:

$$b'_щ = b_щ \frac{D_{н2}}{D_к} = 0{,}32\frac{3{,}55}{2{,}8} \approx 0{,}41 \text{ см};$$

$$t'_к = t_к \frac{D_{н2}}{D_к} = 0{,}34\frac{3{,}55}{2{,}8} = 0{,}43 \text{ см}.$$

Удельная магнитная проводимость для полей рассеяния обмотки якоря

$$\lambda_2 = \left[0{,}6\frac{2h_{п2}}{b'_{п2} + b''_{п2}} + \frac{l_{л2}}{l_0} + 0{,}92 \log\left(\frac{\pi t_2}{a_п}\right)\right]\cdot 10^{-8} =$$

$$= \left[0{,}6\frac{2\cdot 10}{5{,}8 + 2{,}2} + \frac{1{,}2\cdot 3{,}55}{3{,}6} + 0{,}92 \log\left(\frac{\pi\, 0{,}86}{0{,}16}\right)\right]\cdot 10^{-8} = 3{,}8\cdot 10^{-8} \text{ Вб/(А·см)}.$$

Среднее значение реактивной э. д. с. в коммутирующей секции якоря

$$e_{р} = 2w'_{c2}\lambda_2 A_2 l_0 v_2 \cdot 10^2 = 2 \cdot 45 \cdot 3,8 \cdot 10^{-8} \cdot 71 \cdot 3,6 \cdot 7,43 \cdot 10^2 \approx 0,65 \text{ В}.$$

Э. д. с. от поля якоря в этой секции

$$e_{а} = \frac{0,4\pi w'_{c2} A_2 \tau_2 l_0 v_2 \cdot 10^{-6}}{\delta_0} = \frac{0,4\pi \cdot 45 \cdot 71 \cdot 5,6 \cdot 3,6 \cdot 7,43 \cdot 10^{-6}}{0,9} \approx 0,67 \text{ В},$$

где $\delta_0 \approx \frac{\tau_2 - b_0}{2} = \frac{5,6 - 3,8}{2} = 0,9$ см.

Результирующая э. д. с. в короткозамкнутой секции якоря

$$e = e_{р} + e_{а} = 0,65 + 0,65 = 1,33 \text{ В},$$

что вполне допустимо, так как $e < 1,5$ в.

Расчет магнитной системы двигателя

Принимаем конструкцию магнитной системы проектируемого двигателя с отъемными полюсами (рис. 1.13, *а*).

33. Длина воздушного зазора под полюсом

$$\delta = 0,25 \frac{\tau_2 A_2}{B_\delta} \cdot 10^{-4} = 0,25 \frac{5,6 \cdot 71}{0,35} \cdot 10^{-4} \approx 0,028 \text{ см};$$

примем $\delta = 0,25$ мм.

34. Высота сердечника якоря

$$h_{c2} = \frac{D_{н2} - (2h_{п2} + d_{вл})}{2} = \frac{35,5 - (2 \cdot 10 + 6,5)}{2} = 4,5 \text{ мм};$$

где принято $d_{вл} \approx 0,183 \cdot 35,5 = 6,5$ мм.

Проверка индукции в сердечнике

$$B_{c2} = \frac{\Phi_\delta \cdot 10^4}{2 \cdot 0,93 l_0 h_{c2}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{2 \cdot 0,93 \cdot 3,6 \cdot 0,45} = 1,6 \text{ Т},$$

что допустимо.

35. Размеры полюса (рис. 1.13, *а*).

Осевая длина

$$l_{п} = l_0 = 3,6 \text{ см}.$$

Высота

$$h_{п} = (0,25 \div 0,40) D_{н2} = 0,31 \cdot 3,55 = 1,1 \text{ см};$$

Примем $B_{п} = 1,2$ Т, тогда сечение полюса

$$Q_{п} = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{B_{п}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^4}{1,2} = 4,4 \text{ см}^2;$$

$$b_{п} = \frac{Q_{п}}{k_2 l_{п}} = \frac{4,4}{0,95 \cdot 3,6} \approx 1,3 \text{ см};$$

Полюсы выполняются шихтованными; материал — листовая электротехническая сталь марки Э11 толщиной 0,5 мм (ГОСТ 802—58, приложение IV).

36. Размеры станины.

Сечение

$$Q_{c1} = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{2B_{c1}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^4}{2 \cdot 1,2} = 2,2 \text{ см}^2,$$

где $B_{c1} = 1,2$ Т.

Осевая длина $l_1 = l_0 + 3$ см $= 3,6 + 3 = 6,6$ см.

Высота

$$h_{c1} = \frac{Q_{c1}}{k_2 l_1} = \frac{2,2}{1 \cdot 6,6} \approx 0,33 \text{ см},$$

примем $h_{c1} = 0,35$ см; материал — корпусная сталь 10.

37. Эскиз магнитной системы двигателя в масштабе (рис. 1.13, *а*). Из эскиза получаются следующие средние длины путей магнитного поля в каждом участке:

$$L_{c1} = 10,0 \text{ см}; \quad L_п = 2h_п = 2 \cdot 1,1 = 2,2 \text{ см};$$

$$L_{з2} = 2h_{з2} = 2 \cdot 1,0 = 2,0 \text{ см}; \quad L_{c2} = 1,7 \text{ см}.$$

38. М. д. с. для воздушного зазора.

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_2 + 10\delta}{b'_{з2} + 10\delta} = \frac{0,86 + 10 \cdot 0,025}{0,70 + 10 \cdot 0,025} = 1,17.$$

М. д. с.

$$F_\delta = 1,6 B_\delta k_\delta \delta \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 0,35 \cdot 1,17 \cdot 0,025 \cdot 10^4 = 164.$$

39. М. д. с. для зубцов якоря

Индукция в зубце

$$B_{з2макс} = \frac{B_\delta t_2}{0,93 \cdot b''_{з2}} = \frac{0,35 \cdot 0,86}{0,93 \cdot 0,20} = 1,62 \text{ Т}.$$

М. д. с. $F_{з2} = H_{з2} L_{з2} = 44 \cdot 2,0 = 88$, где $H_{з2} = 44$ — согласно кривой рис. 1.30 для стали марки Э11.

40. М. д. с. для сердечника якоря.

Индукция в сердечнике якоря

$$B_{c2} = \frac{\Phi_\delta \cdot 10^4}{2 \cdot 0,93 \cdot l_0 \cdot h_{c2}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{2 \cdot 0,93 \cdot 3,6 \cdot 0,45} = 1,6 \text{ Т}.$$

М. д. с. $F_{c2} = H_{c2} L_{c2} = 24 \cdot 1,7 = 41$, где $H_{c2} = 24$ — согласно кривой рис. 1.30 для стали марки Э11.

41. М. д. с. для сердечников полюсов.

Индукция в сердечнике полюса

$$B_п = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{k_2 b_п l_п} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^4}{0,95 \cdot 1,3 \cdot 3,6} = 1,18 \text{ Т}.$$

М. д. с. $F_п = H_п L_п = 5,8 \cdot 2,2 \approx 13$, где $H_п = 5,8$ — согласно кривой рис. 1.30 для стали марки Э11.

42. М. д. с. для станины

Индукция в станине

$$B_{c1} = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{2 \cdot k_2 l_1 h_{c1}} = \frac{0,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^4}{2 \cdot 1 \cdot 6,6 \cdot 0,35} = 1,14 \text{ Т}.$$

М. д. с. $F_{c1} = H_{c1} L_{c1} = 5,8 \cdot 10 = 58$, где $H_{c1} = 5,8$ — согласно кривой рис. 1.31 для стали 10.

Листовая сталь марки Э12 толщиной 0,5 мм
Листовая сталь марки Э11 толщиной 0,5 мм
Листовая сталь марки Э31 и Э44 толщиной 0,35 мм
T
B
A/см

Рис. 1.30. Кривые намагничивания листовой электротехнической стали марок Э12, Э11, Э31, Э44

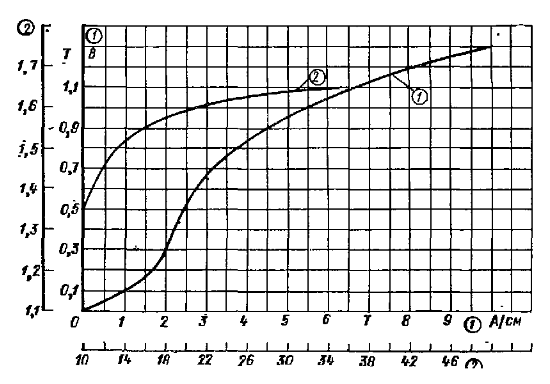


Рис. 1.31. Кривая намагничивания корпусной стали 10

43. М. д. с. для воздушного зазора в стыке между станиной и полюсами. Индукция в зазоре стыка $B_{с\delta} = B_п = 1,18$ Т.
М. д. с.

$$F_{с\delta} = 1,6B_{с\delta}\delta_с \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 1,18 \cdot 0,004 \cdot 10^4 \approx 75.$$

44. Характеристика холостого хода двигателя. Эта характеристика рассчитывается согласно позиции 44 и табл. 1.3.

45. М. д. с. якоря.

Поперечная м. д. с. якоря. Из переходной характеристики, построенной по данным табл 1.3, согласно рис. 1.14 для проектируемого двигателя получается $F_q = 62$.

Продольная м. д. с. якоря

$$F_\beta = 2b_\beta A_2 = 2 \cdot 0,025 \cdot 71 \approx 4.$$

Коммутационная м. д. с. якоря

$$F_к = b_к A_{2н} \frac{i_2^2\omega}{a_0' + b_0' i_2 + \omega i_2}\left(1 + \frac{0,2\pi\tau_2 \cdot 10^{-8}}{\lambda_2\delta_0}\right) =$$

$$= 0,84 \cdot 71 \frac{1}{2,55 + 0,51 + 1}\left(1 + \frac{0,2\pi \cdot 5,6 \cdot 10^{-8}}{3,8 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9}\right) \approx 30;$$

$$L_\sigma = \frac{w_{с2}'\lambda_2 A_2 l_0 b_щ'}{i_{\sigma н}} = \frac{45 \cdot 3,8 \cdot 10^{-8} \cdot 71 \cdot 3,6 \cdot 0,41}{\frac{0,68}{2}} \approx 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ Г};$$

$$R_щ = \frac{\Delta U_щ}{2I_щ} = \frac{2,4}{2 \cdot 0,68} = 1,76 \text{ Ом}; \qquad T_к = \frac{b_щ}{v_к} = \frac{0,32}{585} = 0,545 \cdot 10^{-3}\text{с};$$

$$A = \frac{R_щ T_к}{L_\sigma} = \frac{1,76 \cdot 0,545 \cdot 10^{-3}}{5,3 \cdot 10^{-4}} \approx 1,8; \qquad a_0' = \frac{1,7a'A}{\Delta U_щ} = \frac{1,7 \cdot 2 \cdot 1,8}{2,4} = 2,55;$$

$$b_0' = \frac{1,7b'A}{\Delta U_щ} = \frac{1,7 \cdot 0,4 \cdot 1,8}{2,4} = 0,51.$$

Суммарная м. д. с. якоря для двигателя будет

$$F_R = F_q - F_\beta - F_к = 62 - 4 - 30 = 28.$$

46. Полная м. д. с. возбуждения двигателя при нагрузке на пару полюсов

$$F_в = F_\delta + F_{з2} + F_{с2} + F_п + F_{с1} + F_{с\delta} + F_R =$$

$$= 164 + 88 + 42 + 13 + 58 + 75 + 28 = 468.$$

Расчет обмотки возбуждения

47. Число витков последовательной обмотки возбуждения на полюс

$$W_с = \frac{F_в}{2I_2} = \frac{468}{2 \cdot 0,68} = 344\,(390).$$

48. Сечение и диаметр провода обмотки возбуждения. Плотность тока в обмотке предварительно выбираем по кривой рис. 1.16 для

$$M_2 = 955 \frac{P_2}{n} = 955 \frac{40}{4000} = 9{,}55 \text{ Н·см}$$

и закрытого исполнения двигателя продолжительного режима

$$j_1' = 5{,}6 \text{ А/мм}^2;$$

предварительно

$$q_1' = \frac{I_2}{j_1'} = \frac{0{,}68}{5{,}6} = 0{,}121 \text{ мм}^2.$$

По ГОСТ 6324—52 (приложение I) окончательно принимаем:

$$q_1 = 0{,}113 \text{ мм}^2; \quad d_1/d_{1и} = 0{,}38/0{,}49 \text{ мм},$$

марка провода ПЭЛШО.

49. Окончательная плотность тока в проводнике обмотки возбуждения

$$j_1 = \frac{I_2}{q_1} = \frac{0{,}68}{0{,}113} = 6{,}0 \text{ А/мм}^2.$$

50. Сопротивление обмоти возбуждения в нагретом состоянии при 75° С. Средняя длина витка катушки (согласно рис. 1.13, *а*)

$$l_{ср1} = 2(b_п + l_п + 2\delta_к) = 2(1{,}3 + 3{,}6 + 2\cdot 1{,}2) - 14{,}6 \text{ см},$$

где предварительно принято $\delta_к = 1{,}2$ см.

Сопротивление последовательной обмотки возбуждения

$$r_с = 1{,}22 \frac{2pW_с l_{ср1}}{5700 \cdot q_1} = 1{,}22 \cdot \frac{2\cdot 344 \cdot 14{,}6}{5700 \cdot 0{,}113} = 19{,}0 \text{ Ом } (21{,}5 \text{ Ом}).$$

51. Падение напряжения в обмотке возбуждения

$$\Delta U_1 = I_2 r_с = 0{,}68 \cdot 19{,}0 = 13 \text{ В } (15 \text{ В}).$$

52. Проверка величины э. д. с. якоря при нагрузке.

$$F = U - \Delta U_2 - \Delta U_щ - \Delta U_1 = 110 - 12{,}0 - 2{,}4 - 13{,}0 = 82{,}6 \text{ В } (80{,}6 \text{ В}).$$

Так как полученная здесь величина э. д. с. E отклоняется от предварительного значения ее в позиции 2 более чем на + 3%, то для получения заданной скорости вращения нужно внести поправку в величину необходимой м. д. с. возбуждения двигателя. Для этого по полученному в данной позиции значению э. д. с. E и характеристике холостого хода (рис. 1.15) определяем $F_р' = 510$ и полную м. д. с. возбуждения:

$$F_в = F_р' + F_R = 510 + 28 = 538.$$

После этого производится окончательный перерасчет величин позиций 47, 50, 51 и 52 (окончательные данные указаны в скобках).

53. Потребная площадь окна для размещения обмотки возбуждения на полюсе

$$Q_с' \approx \frac{W_с d_{1и}^2}{f_0'} = \frac{390 \cdot 0{,}49^2}{0{,}86} \approx 110 \text{ мм}^2,$$

где принято $f_0' = 0{,}86$.

54. Фактическая площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q_c = (1,1 \div 1,2)\, Q_c^1 = 1,1 \cdot 110 = 120 \text{ мм}^2,$$

т. е. примерно $8 \cdot 15 = 120$ мм².

Укладка обмотки на полюсе (рис. 1.13, *а*)

$$h_к = h_п - 3 \text{ мм} = 11 - 3 = 8 \text{ мм}.$$

Число витков по высоте катушки

$$m'' = \frac{h_к - 0,8 \text{ мм}}{d_{1и}} = \frac{8 - 0,8}{0,49} \approx 15.$$

Число слоев в катушке

$$m' = \frac{W_c}{m''} = \frac{390}{15} = 26.$$

Толщина катушки

$$\delta_к = d_{1и} m' = 0,049 \cdot 26 \approx 1,3 \text{ см}.$$

Потери и к. п. д. двигателя

55. Потери в обмотках якоря и возбуждения

$$P_{м2} = I_2^2 r_2 = 0,68^2 \cdot 17,3 = 8,0 \text{ Вт};$$

$$P_{м1} = I_2^2 r_c = 0,68^2 \cdot 21,5 = 9,9 \text{ Вт}.$$

56. Переходные потери в контактах щеток и коллектора

$$P_{щ.к} = I_2\, \Delta U_щ = 0,68 \cdot 2,4 = 1,63 \text{ Вт}.$$

57. Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря. Масса стали

$$G_{c2} = 5,5\,(D_{н2} - 2h_{п2})^2\, l_0 \cdot 10^{-3} = 5,5\,(3,55 - 2 \cdot 1,0)^2 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} \approx 0,048 \text{ кг};$$

$$G_{з2} = 7,8 z_2 b''_{з2} h_{п2} l_0\, 10^{-3} = 7,8 \cdot 13 \cdot 0,20 \cdot 1,0 \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 0,073 \text{ кг}.$$

Потери

$$P_{c2} = p_{c2} B'^2_{c2} G_{c2} = 11,2 \cdot 1,69^2 \cdot 0,048 = 1,54 \text{ Вт};$$

$$P_{з2} = p_{з2} B'^2_{з2} G_{з2} = 11,0 \cdot 1,72^2 \cdot 0,073 = 2,37 \text{ Вт};$$

$$\Sigma P_c = P_{c2} + P_{з2} = 1,54 + 2,37 = 3,91 \text{ Вт},$$

где

$$p_{c2} = 2\varepsilon\left(\frac{f_2}{100}\right) + 2,5\rho\left(\frac{f_2}{100}\right)^2 = 2 \cdot 4,1\left(\frac{67}{100}\right) + 2,5 \cdot 5,1\left(\frac{67}{100}\right)^2 \approx 11,2 \text{ Вт/кг};$$

$$p_{з2} = 1,5\varepsilon\left(\frac{f_2}{100}\right) + 3\rho\left(\frac{f_2}{100}\right)^2 = 1,5 \cdot 4,1\left(\frac{67}{100}\right) + 3 \cdot 5,1\left(\frac{67}{100}\right)^2 = 11,0 \text{ Вт/кг};$$

$$B'_{c2} = B_{c2}\frac{E'}{E} = 1,6\frac{80,6}{76} = 1,69 \text{ Т};$$

$$B'_{з2} = B_{з2}\frac{E'}{E} = 1,62\frac{80,6}{76} = 1,72 \text{ Т}.$$

58. Механические потери в двигателе

$$P_{т.щ} = \mu p_{щ} S'_{щ} v_{к} = 0{,}25 \cdot 2{,}45 \cdot 2 \cdot 0{,}13 \cdot 5{,}85 \approx 0{,}93 \text{ Вт};$$

$$P_{т.п} = k_m G_a n \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 0{,}35 \cdot 4000 \cdot 10^{-3} = 4{,}2 \text{ Вт},$$

где $k_m = 3$;

$$G_a = \frac{\pi}{4}\left(D^2_{н2} l_0 + D^2_{к} l_{к}\right)\gamma_a \cdot 10^{-3} =$$

$$= \frac{\pi}{4}\left(3{,}55^2 \cdot 3{,}6 + 2{,}8^2 \cdot 0{,}95\right) 8{,}5 \cdot 10^{-3} \approx 0{,}35 \text{ кг};$$

$$P_{т.в} = 2 D^3_{н2} n^3 l_0 \cdot 10^{-14} = 2 \cdot 3{,}55^3 \cdot 4000^3 \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-14} \approx 0{,}20 \text{ Вт};$$

$$P_{мх} = P_{т.щ} + P_{т.п} + P_{т.в} = 0{,}93 + 4{,}2 + 0{,}20 \approx 5{,}33 \text{ Вт}.$$

59. Общие потери в двигателе

$$\Sigma P = \zeta\left(P_{м2} + P_{м1} + P_{щ.к} + \Sigma P_{с} + P_{мх}\right) =$$

$$= 1{,}12(8{,}0 + 9{,}9 + 1{,}63 + 3{,}91 + 5{,}33) \approx 32{,}4 \text{ Вт}.$$

60. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке двигателя

$$\eta = \frac{UI - \Sigma P}{UI} \cdot 100 = \frac{110 \cdot 0{,}68 - 32{,}4}{110 \cdot 0{,}68} \cdot 100 = \frac{42{,}6}{75} \cdot 100 = 57\%.$$

Так как полезная мощность на валу двигателя при токе якоря $I_2 = 0{,}68$ А оказалась больше заданной, то следует определить новое значение потребляемого двигателем тока соответственно номинальной мощности его $P_2 = 40$ Вт

$$A = \frac{\frac{U}{\zeta} - \Delta U_{щ}}{r_2 + r_{с}} = \frac{\frac{110}{1{,}12} - 2{,}4}{17{,}3 + 21{,}5} = 2{,}46;$$

$$B = \frac{\frac{P_2}{\zeta} + \Sigma P_{с} + P_{мх}}{r_2 + r_{с}} = \frac{\frac{40}{1{,}12} + 3{,}91 + 5{,}33}{17{,}3 + 21{,}5} = 1{,}16,$$

тогда

$$I'_2 = \frac{A}{2} - \sqrt{\frac{A^2}{4} - B} = \frac{2{,}46}{2} - \sqrt{\frac{2{,}46^2}{4} - 1{,}16} \approx 0{,}65 \text{ А}$$

и к. п. д.

$$\eta' = \frac{UI' - \Sigma P'}{UI'} \cdot 100 = \frac{110 \cdot 0{,}65 - 31{,}5}{110 \cdot 0{,}65} \cdot 100 = \frac{40}{71{,}5} \cdot 100 = 56\%,$$

где $I' = I'_2 = 0{,}65$ А; $\Sigma P' = 31{,}5$ и вычислена с учетом уменьшения потерь $P_{м2}$, $P_{м1}$ и $P_{щ.к}$ соответственно новому значению тока.

61. Рабочие характеристики двигателя. Эти характеристики могут быть вычислены с помощью табл. 1.5 позиции 63.

62. Кратность наибольшего пускового момента двигателя

$$\varepsilon_{щ}=\frac{\Delta U_{щ}}{U}=\frac{2,4}{110}=0,022; \quad k_c=\frac{I_{ср\,1}}{\pi D_{н2}^2}=\frac{14,6}{\pi\cdot 3,55^2}=0,37;$$

$\gamma=0,28$ — согласно рис. 1.18 и уравнению (1.14).

Кратность наибольшего пускового тока при неподвижном якоре

$$i_{2m}=\frac{5700\,(1-\varepsilon_{щ})\,UI_2}{\pi D_{н2}^2\,[(\xi+k)\,A_2 j_2+pk_c F_в j_1]}=$$

$$=\frac{5700\,(1-0,022)\cdot 110\cdot 0,65}{\pi\cdot 3,55^2\,[(1+1,2)\,71,5\cdot 5,95+1\cdot 0,37\cdot 510\cdot 6]}=4,9.$$

Кратность наибольшего пускового момента по отношению к номинальному

$$m_п=i_{2m}^{1+\gamma}=4,9^{1+0,28}=7,7.$$

Тепловой расчет электродвигателя (по формулам гл. 8)

63. Превышение температуры якоря двигателя. Удельные потери в обмотке и стали якоря, приходящиеся на один паз

$$w_{м2}=\frac{I_2^2 r_2}{z_2 l_{ср\,2}}=\frac{0,65^2\cdot 17,3}{13\cdot 7,9}=0,071\ \text{Вт/см};$$

$$w_c=\frac{\Sigma P_c}{z_2 l_0}=\frac{3,91}{13\cdot 3,6}\approx 0,084\ \text{Вт/см};$$

$$\alpha_a=\alpha'\,(1+0,1\cdot v_2)=0,0020\,(1+0,1\cdot 7,43)\approx 0,0035\ \text{Вт/(см}^2\cdot\text{град)};$$

$$\lambda'=0,0012\ \text{Вт/(см}^2\cdot\text{град)}; \quad \Pi=2,2\ \text{см};$$

$$k_c=1+4\left(\frac{d_2}{d_{2н}}-0,4\right)=1+4\left(\frac{0,27}{0,37}-0,4\right)=2,3;$$

$$\beta_2=\frac{m_a}{4}\,\frac{d_{2н}}{k_c}=\frac{7}{4}\,\frac{0,037}{2,3}=0,028\ \text{см};$$

$$\beta=\beta_1+\beta_2=0,03+0,028=0,058\ \text{см}.$$

Среднее превышение температуры обмотки якоря над окружающей средой

$$\Delta\vartheta_a=\frac{\left(1+\alpha_a b'_{з2}\,\dfrac{\beta}{\lambda'\Pi}\right)w_{м2}+w_c}{\alpha_a b'_{з2}}=$$

$$=\frac{\left(1+0,0035\cdot 0,70\cdot\dfrac{0,058}{0,0012\cdot 2,2}\right)\cdot 0,071+0,084}{0,0035\cdot 0,7}=65^\circ\,\text{C},$$

что допустимо.

64. Превышение температуры коллектора двигателя. Полные потери на коллекторе

$$P_к=P_{щ.\,к}+P_{т.\,щ}=1,63+0,93=2,56\ \text{Вт}.$$

Поверхность охлаждения коллектора

$$S_к = \pi D_к l_к = \pi \cdot 2,8 \cdot 0,95 = 8,3\ см^2.$$

Среднее превышение температуры коллектора над окружающей средой

$$\Delta\vartheta_к = \frac{P_к}{\alpha_к (1 + 0,1 v_к) S_к} = \frac{2,56}{0,006 (1 + 0,1 \cdot 5,85) \cdot 8,3} \approx 33° C,$$

что вполне допустимо.

65. Превышение температуры обмотки возбуждения двигателя. Потери в одной катушке возбуждения

$$w_{м1} = \frac{P_{м1}}{2p} = \frac{0,65^2 \cdot 21,5}{2} = 4,53\ Вт.$$

Поверхности охлаждения одной катушки (рис. 1.13, *а*):

$$S_1 = 2 (b_п + l_п + 4\delta_к) h_к = 2 (1,3 + 3,6 + 4 \cdot 1,3)\, 0,8 \approx 16\ см^2;$$

$$S_2 = 2 (b_п + l_п + 2\delta_к) \delta_к + 2 l_п \delta_к = 2 (1,3 + 3,6 + 2 \cdot 1,3)\, 1,3 + 2 \cdot 3,6 \cdot 1,3 \approx 29\ см^2;$$

$$S_3 = 2 (b_п + 2\delta_к) \delta_к = 2 (1,3 + 2 \cdot 1,3)\, 1,3 = 10\ см^2;$$

$$S_4 = 2 (b_п + l_п) h_к = 2 (1,3 + 3,6)\, 0,8 \approx 8\ см^2.$$

Толщины изоляции:

$$\beta'_э = \frac{m'}{4} \frac{d_{1и}}{k_с} = \frac{26}{4} \cdot \frac{0,049}{2,5} = 0,127\ см;$$

$$\beta_1 = \beta_4 = \beta' + \beta'_э = 0,011 + 0,127 = 0,138\ см;$$

$$\beta''_э = \frac{m''}{4} \cdot \frac{d_{1и}}{k_с} = \frac{15}{4} \cdot \frac{0,049}{2,5} \approx 0,074\ см;$$

$$\beta_2 = \beta_3 = \beta'' + \beta''_э = 0,011 + 0,074 = 0,085\ см;$$

$$S'_с = \frac{\pi D_1 l_1}{2p} - S_2 = \frac{\pi \cdot 5,8 \cdot 6,6}{2} - 29 = 31\ см^2;$$

$$S''_с = \frac{\pi D_{ш} l_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 6,5 \cdot 6,6}{2} = 67\ см^2.$$

Коэффициенты:

$$A = \frac{1}{\alpha'_с S'_с + \alpha''_с S''_с} + \frac{1}{\lambda_2 \frac{S_2}{\beta_2} + \lambda_4 \frac{S_4}{\beta_4}} =$$

$$= \frac{1}{0,00055 \cdot 31 + 0,00115 \cdot 67} + \frac{1}{0,00085 \frac{29}{0,085} + 0,00085 \frac{8}{0,138}} = 13,6;$$

$$B=\cfrac{1}{\cfrac{\lambda_1\alpha_0''S_1}{\lambda_1+\alpha_0''\beta_1}+\cfrac{\lambda_3\alpha_0''S_3}{\lambda_3+\alpha_0''\beta_3}}=$$

$$=\cfrac{1}{\cfrac{0{,}00085\cdot 0{,}00085\cdot 16}{0{,}00085+0{,}00085\cdot 0{,}138}+\cfrac{0{,}00085\cdot 0{,}00085\cdot 10}{0{,}00085+0{,}00085\cdot 0{,}085}}=50{,}5.$$

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над окружающей средой

$$\Delta\vartheta_c=\frac{AB}{A+B}w_{м1}=\frac{13{,}6\cdot 50{,}5}{13{,}6+50{,}5}4{,}53=48^\circ\,C,$$

что допустимо.

ГЛАВА ВТОРАЯ

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ БЕЗРЕОСТАТНОГО ПУСКА И РЕВЕРСА ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

В автономных электрических установках постоянного тока с с весьма ограниченной мощностью источника энергии при питании электродвигателей малой мощности, работающих в основном в неустановившихся режимах, важное значение имеет проблема ограничения толчков тока при частых пусках и реверсах двигателя и повышения к. п. д. его.

Решение данной проблемы связано с правильным выбором типа двигателя в отношении продолжительности режима работы в соответствии с заданным графиком. Двигатель постоянного тока для продолжительного режима работы с высоким к. п. д., будучи использованным в условиях частых пусков и реверсов, имеет высокую кратность пускового тока и значительно увеличенные потери в обмотке якоря по сравнению с номинальным режимом. Наоборот, двигатель той же мощности, но для кратковременного режима работы с высоким использованием активных материалов, имеет меньшие массу (вес) и габариты и значительно меньшие кратность пускового тока и средние потери в обмотке якоря по сравнению с предыдущим двигателем.

В основу расчета безреостатного пуска и реверса положены дифференциальные уравнения переходных процессов в машинах постоянного тока [5] при следующих упрощениях.

Если заменить кривую намагничивания двигателя спрямленной характеристикой, пренебречь реакцией якоря, вихревыми токами и остаточным магнетизмом в магнитной системе и принять линейную зависимость нагрузочного момента на валу двигателя от скорости вращения, то уравнения переходных процессов в относи-

тельных единицах для малых двигателей независимого, параллельного и смешанного возбуждений будут иметь следующий вид [5]:

$$\frac{di_2}{dt}=-\frac{\varepsilon_2}{T_2}i_2+\frac{\varepsilon_{в}T_{с}}{T_2T_{в}}\varphi-\frac{1}{T_2}\varphi\omega+\frac{(\varepsilon u-\varepsilon_{щ})T_{в}-\varepsilon_{в}T_{с}}{T_2T_{в}};$$

$$\frac{d\varphi}{dt}=-\frac{\varepsilon_{в}}{T_{в}}\varphi+\frac{\varepsilon_{в}}{T_{в}}; \qquad (2\text{-}1)$$

$$\frac{d\omega}{dt}=-\frac{\varepsilon_{м}}{T_{м}}\omega+\frac{1}{T_{м}}\varphi i_2-\frac{\varepsilon_{м0}}{T_{м}},$$

и для малых двигателей последовательного возбуждения:

$$\frac{di_2}{dt}=-\frac{\varepsilon_2}{T_{2с}}i_2-\frac{1}{T_{2с}}\omega i_2+\frac{\varepsilon u-\varepsilon_{щ}}{T_{2с}};$$

$$\frac{d\omega}{dt}=-\frac{\varepsilon_{м}}{T_{м}}\omega+\frac{1}{T_{м}}i_2^2-\frac{\varepsilon_{м0}}{T_{м}}, \qquad (2\text{-}2)$$

где i_2, φ и ω — относительные значения тока, полезного поля в воздушном зазоре и скорости вращения якоря в долях номинальных значений; остальные обозначения даны ниже.

В случае двигателей независимого и параллельного возбуждений с предварительно включенной в сеть обмоткой возбуждения нужно в уравнениях (2-1) положить:

$$T_{с}=0; \quad \varphi=1 \quad \text{и} \quad \frac{d\varphi}{dt}=0,$$

тогда решение полученной системы уравнений имеет вид [5]:

при апериодическом процессе

$$i_2=\eta'+\alpha_1e^{s_1t}+\alpha_2e^{s_2t};$$
$$\omega=\zeta'+\gamma_1e^{s_1t}+\gamma_2e^{s_2t}; \qquad (2\text{-}3)$$

при периодическом процессе

$$i_2=\eta'+\alpha_0e^{st}\sin(\nu t+\delta');$$
$$\omega=\zeta'+\gamma_0e^{st}\sin(\nu t+\psi'). \qquad (2\text{-}4)$$

2-1. РАСЧЕТ БЕЗРЕОСТАТНОГО ПУСКА И РЕВЕРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НЕЗАВИСИМОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННОЙ В СЕТЬ ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Данные для расчета относительных параметров двигателя

92. Индуктивность обмотки якоря

$$L_2=22\frac{a^3N_2^2D_{я2}l_0\cdot10^{-11}}{p^2a^2k_\delta\delta}, \text{ Г.}$$

93. Установившаяся угловая скорость вращения якоря

$$\Omega=\frac{2\pi n}{60}, \text{ рад/с}.$$

94. Момент магнитных и механических потерь двигателя

$$M_0=\frac{\Sigma P_{с}+P_{мх}}{\Omega}\cdot 10^2, \text{ Н·см}.$$

95. Нагрузочный момент на валу двигателя

$$M_2=955\,\frac{P_2}{n}, \text{ Н·см}.$$

96. Момент инерции якоря

$$J=\frac{1}{4}\Big[(G_{м2}+G_{з2})(D_{н2}-h_{п2})^2+\frac{1}{2}G_{с2}(D_{н2}-2h_{п2})^2+G_{к}\left(D_{к}-h_{к}'\right)^2\Big], \text{ кг·см}^2,$$

или приближенно этот момент можно вычислить по формуле

$$J\approx 8D_{н2}^4 l_0\cdot 10^{-4}, \text{ кг·см}^2.$$

97. Постоянная обмотки якоря

$$c=\frac{N_2}{2\pi}\,\frac{p}{a}.$$

В позициях 92—97 $a=1$; P_2 и n берутся по заданию; α — из позиции 3; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4; p — из позиции 6; N_2 — из позиции 12; $h_{п2}$ — из позиции 21; $D_{к}$ — из позиции 27; δ — из позиции 33; k_δ — из позиции 38; $\sum P_{с}$ — из позиции 62; $P_{мх}$ — из позиции 63; Ω — из позиции 93; $G_{м2}$ и $G_{к}$ — масса обмотки якоря и коллектора соответственно, кг; $h_{к}'$ — высота коллекторной пластины.

Относительные параметры двигателя

98. Относительные падения напряжения при номинальных условиях

$$\varepsilon=\frac{U}{E};\quad \varepsilon_2=\frac{I_2r_2+b'}{E};\quad \varepsilon_{щ}=\frac{a'}{E}.$$

99. Относительные моменты потерь и нагрузки на валу при номинальных условиях

$$\varepsilon_{м0}=\frac{M_0\cdot 10^{-2}}{c\Phi_\delta I_2};\quad \varepsilon_{м}=\frac{M_2\cdot 10^{-2}}{c\Phi_\delta I_2}.$$

100. Постоянные времени двигателя при номинальных условиях

$$T_2=\frac{L_2I_2}{E}, \text{ с};\quad T_{м}=\frac{J\Omega\cdot 10^{-4}}{c\Phi_\delta I_2}, \text{ с}.$$

101. Начальные значения тока якоря и угловой скорости вращения двигателя

Значения их в относительных единицах берутся в момент времени $t=0$:

$$i_2(0)=\alpha_0'; \quad \omega(0)=\gamma_0'.$$

При безреостатном пуске двигателя

$$\alpha_0'=0 \quad \text{и} \quad \gamma_0'=0,$$

при реверсе

$$\alpha_0'>0 \quad \text{и} \quad \gamma_0'>0.$$

В позициях 98—101 U берется по заданию; I_2 — из позиции 2 или 65; Φ_δ — из позиции 8; r_2 — из позиции 23; a' и b' — из позиции 45; E — из позиции 46, если пуск двигателя производится при полной нагрузке на валу; L_2 — из позиции 92; Ω — из позиции 93; M_0 — из позиции 94; M_2 — из позиции 95; J — из позиции 96; c — из позиции 97.

102. Коэффициенты расчетных формул [5]

$$A=\frac{\varepsilon_2 T_М+\varepsilon_М T_2}{T_2 T_М}; \quad B=\frac{1+\varepsilon_2\varepsilon_М}{T_2 T_М};$$

$$C_1=\frac{T_М(\varepsilon u-\varepsilon_{щ})+T_2\varepsilon_М\alpha_0'-T_М\gamma_0'}{T_2 T_М}; \quad D_1=\frac{\varepsilon_{М0}+\varepsilon_М(\varepsilon u-\varepsilon_{щ})}{T_2 T_М};$$

$$C_2=\frac{T_2(\alpha_0'-\varepsilon_{М0})+T_М\varepsilon_2\gamma_0'}{T_2 T_М}; \quad D_2=\frac{(\varepsilon u-\varepsilon_{щ})-\varepsilon_2\varepsilon_{М0}}{T_2 T_М};$$

при этом нужно положить:

$u=1$ при безреостатном пуске двигателя,

$u=-1$ при реверсе его.

Здесь параметры в формулах берутся из позиций 98—101.

Расчет тока и угловой скорости вращения при пуске (рис. 2.1) и реверсе двигателя

103. Установившиеся значения тока и угловой скорости вращения двигателя

Ток

$$\eta'=\frac{\varepsilon_{М0}+\varepsilon_М(\varepsilon u-\varepsilon_{щ})}{1+\varepsilon_2\varepsilon_М}.$$

Угловая скорость

$$\zeta'=\frac{\varepsilon u-\varepsilon_{щ}-\varepsilon_2\varepsilon_{М0}}{1+\varepsilon_2\varepsilon_М}.$$

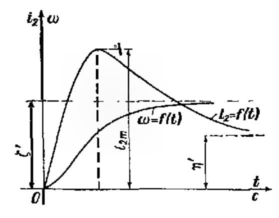


Рис. 2.1. Кривые тока и угловой скорости вращения при безреостатном пуске двигателя

104. Уравнения тока и угловой скорости вращения при пуске и реверсе двигателя

Эти величины определяются уравнениями (2-3) и (2-4) в относительных единицах.

105. Коэффициенты уравнений (2-3) и (2-4) [5]

При апериодическом процессе:

$$s_{1,2} = -\frac{A}{2} \pm \sqrt{\frac{A^2}{4} - B};$$

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_0' s_1^2 + C_1 s_1 + D_1}{s_1 (s_1 - s_2)}; \quad \alpha_2 = -\frac{\alpha_0' s_2^2 + C_1 s_2 + D_1}{s_2 (s_1 - s_2)};$$

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_0' s_1^2 + C_2 s_1 + D_2}{s_1 (s_1 - s_2)}; \quad \gamma_2 = -\frac{\gamma_0' s_2^2 + C_2 s_2 + D_2}{s_2 (s_1 - s_2)}.$$

При периодическом процессе:

$$s = -\frac{A}{2}; \quad \nu = \sqrt{B - \frac{A^2}{4}};$$

$$\alpha_0 = \frac{\sqrt{a_1^2 + (\nu b_1)^2}}{\nu B}; \quad \operatorname{tg} \delta' = \frac{\nu b_1}{a_1};$$

$$\gamma_0 = \frac{\sqrt{a_2^2 + (\nu b_2)^2}}{\nu B}; \quad \operatorname{tg} \psi' = \frac{\nu b_2}{a_2},$$

где

$$a_1 = \alpha_0' s B + C_1 B + D_1 s; \quad b_1 - \alpha_0' B - D_1;$$

$$a_2 = \gamma_0' s B + C_2 B + D_2 s; \quad b_2 = \gamma_0' B - D_2.$$

106. Время наступления максимума пускового тока и его значение [5]

При апериодическом процессе

$$t_m = \frac{2,3}{s_1 - s_1} \log\left(-\frac{s_2 \alpha_2}{s_1 \alpha_1}\right), \text{ с};$$

$$i_{2m} = \eta' + \alpha_1 e^{s_1 t_m} + \alpha_2 e^{s_2 t_m}.$$

При периодическом процессе

$$t_m = \frac{\operatorname{arctg}\left(-\frac{\gamma}{s}\right) - \delta'}{\gamma}, \text{ с};$$

$$i_{2m} = \eta' + \alpha_0 e^{s t_m} \sin(\gamma t_m + \delta').$$

В позициях 103—106 ε, ε_2, $\varepsilon_{щ}$, $\varepsilon_{мо}$, $\varepsilon_{м}$ берутся из позиций 98—101, A, B, C_1, D_1, C_2, D_2 — из позиции 102 и остальные величины — из позиции 105.

2-2. РАСЧЕТ БЕЗРЕОСТАТНОГО ПУСКА И РЕВЕРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВКЛЮЧЕНИИ В СЕТЬ ОБМОТОК ЯКОРЯ И ВОЗБУЖДЕНИЯ

107. Основные уравнения

Относительные параметры двигателя, необходимые для данного расчета, определяются позициями 98—101. Кроме того, дополнительные параметры будут:

$$\varepsilon_ш = \frac{I_ш r_ш}{E}; \quad T_ш = \frac{2pW_ш[1+\gamma_\sigma(\sigma-1)]\Phi_\delta}{E}, \text{ с};$$

$$T_с = \frac{2pW_с[1+\gamma_\sigma](\sigma-1)]\Phi_\delta}{E}, \text{ с}$$

и начальное значение полезного магнитного поля в воздушном зазоре в долях номинальной величины в момент $t = 0$

$$\varphi(0) = \beta_0'.$$

При безреостатном пуске двигателя $\beta_0' = 0$, при реверсе $\beta_0' > 0$.

Число полюсов $2p$ берется из позиции 6; Φ_δ — из позиции 8; σ — из позиции 35; E — из позиции 46, если пуск двигателя производится при полной нагрузке на валу; $W_ш$ — из позиции 57; $r_ш$ и $I_ш$ — из позиции 59; $W_с$ — число витков последовательной обмотки двигателя смешанного возбуждения; $\gamma_\sigma = 0{,}75 \div 0{,}85$ — коэффициент сцепления магнитного поля рассеяния с обмоткой возбуждения.

108. Расчет тока, полезного магнитного поля в воздушном зазоре и угловой скорости вращения при пуске и реверсе двигателя

Расчет процессов пуска и реверса двигателя (рис. 2.1) при одновременном включении в сеть обмоток якоря и возбуждения производится по уравнениям (2-1). Так как эти уравнения являются нелинейными, то решение их удобно производить методом последовательных интервалов. Для этой цели указанные уравнения нужно представить в форме конечных приращений. Тогда они примут вид:

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta t} = -\frac{\varepsilon_2}{T_2} i_m + \frac{\varepsilon_ш T_с}{T_2 T_ш}\varphi_m - \frac{1}{T_2}\varphi_m\omega_m + \frac{(\varepsilon u - \varepsilon_ц)T_ш - \varepsilon_ш T_с}{T_2 T_ш};$$

$$\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = -\frac{\varepsilon_ш}{T_ш}\varphi_m + \frac{\varepsilon_ш}{T_ш}; \qquad (2\text{-}5)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} = -\frac{\varepsilon_м}{T_M}\omega_m + \frac{1}{T_M}\varphi_m i_m - \frac{\varepsilon_{м0}}{T_M},$$

где средние значения тока, магнитного поля и угловой скорости вращения за время Δt будут:

$$i_m = i_2 + \frac{\Delta i_2}{2}; \quad \varphi_m = \varphi + \frac{\Delta\varphi}{2}; \quad \omega_m = \omega + \frac{\Delta\omega}{2}; \tag{2-5а}$$

при этом i_2, φ и ω — предыдущие значения соответствующих величин, предшествующие данному промежутку времени Δt.

После соответствующих преобразований уравнений (2-5), с учетом уравнений (2-5а), получаются следующие уравнения для определения приращений тока, поля и угловой скорости вращения за промежуток времени Δt:

$$\Delta i_2 = \frac{2\left[(\varepsilon u - \varepsilon_{щ})\,T_ш - \varepsilon_ш T_c\right]}{a_1 T_ш} - \frac{2\varepsilon_2}{a_1} i_2 + \frac{2\varepsilon_ш T_c}{a_1 T_ш}\varphi - \frac{2\varepsilon_ш}{a_1 a_2}\omega - \frac{2}{a_1}\varphi\omega - \frac{2}{a_1 a_2}\varphi^2 i_2;$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\varepsilon_ш}{a_2}(1 - \varphi); \tag{2-6}$$

$$\Delta\omega = \frac{2\varepsilon_ш}{a_2 a_3} i_2 + \frac{2\left[(\varepsilon u - \varepsilon_{щ})\,T_ш - \varepsilon_ш T_c\right]}{a_1 a_3 T_ш}\varphi - \frac{2\varepsilon_м}{a_3}\omega + \frac{2}{a_3}\varphi i_2 - \frac{2\varepsilon_{м0}}{a_3},$$

где $a_1 = \varepsilon_2 + \dfrac{2T_2}{\Delta t}$; $\quad a_2 = \varepsilon_ш + \dfrac{2T_ш}{\Delta t}$; $\quad a_3 = \varepsilon_м + \dfrac{2T_м}{\Delta t}$,

при этом:

$u = 1$ при безреостатном пуске двигателя,

$u = -1$ при реверсе; $\Delta t \leqslant 0{,}001$ с.

Расчет по уравнениям (2-6) удобно представить в виде табл. 2.1

Таблица 2.1

Δt, с	t, с	i_2	φ	ω	Δi_2	$\Delta\varphi$	$\Delta\omega$
0	0	α'_0	β'_0	γ'_0	0	0	0
Δt	Δt	$i_{21} = \alpha'_0 + \Delta i_{21}$	$\varphi_1 - \beta'_0 + \Delta\varphi_1$	$\omega_1 = \gamma'_0 + \Delta\omega_1$	Δi_{21}	$\Delta\varphi_1$	$\Delta\omega_1$
Δt	$2\Delta t$	$i_{22} = i_{21} + \Delta i_{22}$	$\varphi_2 - \varphi_1 + \Delta\varphi_2$	$\omega_2 = \omega_1 + \Delta\omega_2$	Δi_{22}	$\Delta\varphi_2$	$\Delta\omega_2$
Δt	$3\Delta t$	$i_{23} = i_{22} + \Delta i_{23}$	$\varphi_3 = \varphi_2 + \Delta\varphi_3$	$\omega_3 - \omega_2 + \Delta\omega_3$	Δi_{23}	$\Delta\varphi_3$	$\Delta\omega_3$
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
Δt	$n\Delta t$	$i_{2n} = i_{2n-1} + \Delta i_{2n}$	$\varphi_n - \varphi_{n-1} + \Delta\varphi_n$	$\omega_n = \omega_{n-1} + \Delta\omega_n$	Δi_{2n}	$\Delta\varphi_n$	$\Delta\omega_n$

Установившиеся значения тока и угловой скорости вращения в относительных единицах определяются позицией 103, а полезного магнитного поля в воздушном зазоре по уравнению

$$\xi' = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_ш}.$$

2-3. РАСЧЕТ БЕЗРЕОСТАТНОГО ПУСКА И РЕВЕРСА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

109. Основные уравнения

Относительные параметры двигателя, необходимые для данного расчета, определяются также позициями 98—101, кроме

$$\varepsilon_2 = \frac{I_2(r_2 + r_c) + b'}{E}; \quad T_{2c} = T_2 + T_c, \text{ c},$$

где I_2 берется из позиции 2; r_2 — из позиции 23; b' — из позиции 45; r_c — из позиции 50; E — из позиции 52, если пуск двигателя производится при полной нагрузке на валу; T_c — из позиции 107.

110. Расчет тока и угловой скорости вращения при пуске и реверсе двигателя (рис. 2.1)

Расчет процессов пуска и реверса двигателя последовательного возбуждения производится по нелинейным уравнениям (2-2), которые удобно решать методом последовательных интервалов. Для этого нужно уравнения (2-2) представить в форме конечных приращений:

$$\frac{\Delta i_2}{\Delta t} = -\frac{\varepsilon_2}{T_{2c}} i_m - \frac{1}{T_{2c}} \omega_m i_m + \frac{\varepsilon u - \varepsilon_{щ}}{T_{2c}};$$

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta t} = -\frac{\varepsilon_м}{T_M} \omega_m + \frac{1}{T_M} i_m^2 - \frac{\varepsilon_{м0}}{T_M}, \qquad (2\text{-}7)$$

где средние значения тока и угловой скорости вращения i_m и ω_m за время Δt определяются уравнениями (2-5а).

Приращения тока и угловой скорости вращения за промежуток времени Δt будут:

$$\Delta i_2 = \frac{2(\varepsilon u - \varepsilon_{щ})}{a_1} - \frac{2\varepsilon_2}{a_1} i_2 - \frac{2}{a_1} \omega i_2 - \frac{2}{a_1 a_3} i_2^3,$$

$$\Delta \omega = \frac{4(\varepsilon u - \varepsilon_{щ})}{a_1 a_3} i_2 - \frac{2\varepsilon_м}{a_3} \omega + \frac{2}{a_3} i_2^2 - \frac{2}{a_1 a_3} i_2^2 \omega - \frac{2\varepsilon_{м0}}{a_3}, \qquad (2\text{-}8)$$

где

$$a_1 = \varepsilon_2 + \frac{2T_{2c}}{\Delta t}; \quad a_3 = \varepsilon_м + \frac{2T_м}{\Delta t};$$

при этом:

$u = 1$ при безреостатном пуске двигателя;

$u = -1$ при реверсе; $\Delta t \leqslant 0{,}001$ с.

Расчет по уравнениям (2-8) удобно также представить в виде табл. 2.1.

Установившиеся значения тока и угловой скорости вращения двигателя в относительных единицах из исходных уравнений (2-2) при $\frac{di_2}{dt}=0$ и $\frac{d\omega}{dt}=0$ получаются следующими:

$$\eta' = \frac{\frac{p_1}{3} - \sqrt[3]{\left(\sqrt{\frac{q_1^2}{4}+\frac{p_1^3}{27}}-\frac{q_1}{2}\right)^2}}{\sqrt[3]{\sqrt{\frac{q_1^2}{4}+\frac{p_1^3}{27}}-\frac{q_1}{2}}};$$

$$\zeta' = \frac{\varepsilon u - \varepsilon_{щ} - \varepsilon_2 \eta'}{\eta'},$$

где $p_1 = -(\varepsilon_{м0} - \varepsilon_2 \varepsilon_{м})$; $q_1 = -\varepsilon_{м}(\varepsilon u - \varepsilon_{щ})$.

2-4. УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ БЕЗРЕОСТАТНОГО ПУСКА И РЕВЕРСА МАЛЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННОЙ В СЕТЬ ОБМОТКЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Излагаемый ниже упрощенный метод расчета тока и скорости вращения при безреостатном пуске и реверсе малых двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения при предварительно включенной в сеть обмотке возбуждения основывается на некотором упрощении расчетных формул, представленных в § 2-1.

Данный метод расчета переходных процессов в малых двигателях базируется на допущениях замены кривой намагничивания двигателя спрямленной характеристикой, постоянства индуктивности и сопротивления цепи якоря и пренебрежения влиянием реакции якоря на поле полюсов и вихревыми токами в массивных частях магнитной системы двигателя. При этих допущениях можно данный метод расчета по форме привести к методике расчета переходных процессов в синхронных машинах. Для этого достаточно ввести понятия: переходных постоянных времени цепи якоря и электромеханической, переходной составляющей тока якоря и других величин. Тогда после преобразования и упрощения уравнений (2-3) и (2-4), некоторых относительных параметров в позициях 98 и 100, коэффициентов расчетных формул в позициях 102 и 103 и коэффициентов уравнений (2-3) и (2-4) в позициях 105 и 106 можно представить мгновенные значения тока якоря и угловой скорости вращения при пуске и реверсе двигателей независимого и параллельного возбуждения в относительных единицах в следующем виде:

при апериодическом процессе:

$$i_2 = i_у + (i'_к - i_у)\, e^{-\frac{t}{T'_М}} - (i'_к - i_0)\, e^{-\frac{t}{T'_2}};$$

$$\omega = \omega_у - (\omega_у - \omega_0)\, e^{-\frac{t}{T'_М}}; \qquad (2\text{-}9)$$

при периодическом процессе:

$$i_2 = i_у + i'_0 e^{-\frac{t}{2T'_2}} \sin(\nu t + \delta');$$

$$\omega = \omega_у + \omega'_0 e^{-\frac{t}{T'_2}} \sin(\nu t + \psi'). \qquad (2\text{-}10)$$

Здесь $i_у$ и $i'_к$ — установившийся и переходный токи якоря; i_0 — начальный ток якоря; i'_0 — амплитуда тока якоря при периодическом процессе; $\omega_у$ — установившаяся угловая скорость вращения якоря; ω_0 — начальная угловая скорость вращения; ω'_0 — амплитуда угловой скорости вращения якоря при периодическом процессе; T'_2 и $T'_М$ — переходные постоянные времени цепи якоря и электромеханическая, с.

Относительные значения перечисленных выше величин соответственно в долях номинальных значений тока якоря I_2 и угловой скорости вращения Ω определяются следующим образом:

токи якоря:

$$i_у = \frac{\varepsilon_{м0} + \varepsilon_м(\varepsilon u - \varepsilon_щ)}{1 + \varepsilon_м(\varepsilon_2 + \varepsilon_щ)}; \quad i'_к = \frac{\varepsilon u - \varepsilon_щ - \gamma'_0}{\varepsilon_2 + \varepsilon_щ}; \quad i_0 = \alpha'_0;$$

$$i'_0 = \frac{\sqrt{(i'_к - i_у)(i'_к - i_0) + \frac{T'_2}{T'_М}(i_у - i_0)^2}}{\sqrt{\frac{T'_2}{T'_М} - \frac{1}{4}}}; \qquad (2\text{-}11)$$

угловые скорости вращения:

$$\omega_у = \frac{\varepsilon u - \varepsilon_щ - \varepsilon_{м0}(\varepsilon_2 + \varepsilon_щ)}{1 + \varepsilon_м(\varepsilon_2 + \varepsilon_щ)}; \quad \omega_0 = \gamma'_0;$$

$$\omega'_0 = \frac{(\omega_у - \omega_0)\sqrt{\frac{T'_2}{T'_М}}}{\sqrt{\frac{T'_2}{T'_М} - \frac{1}{4}}} \qquad (2\text{-}12)$$

и переходные постоянные времени:

$$T_2' = T_2 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_{щ}}, \text{ с}; \quad T_M' = T_M \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_{щ}}{1 + \varepsilon_м (\varepsilon_2 + \varepsilon_{щ})}, \text{ с}, \qquad (2\text{-}13)$$

где относительные параметры двигателя в относительных единицах:

$$\varepsilon = \frac{U}{E}; \quad \varepsilon_2 = \frac{I_2 r_2}{E}; \quad \varepsilon_{щ} = \frac{\Delta U_{щ} + 0{,}5\gamma_к e_р}{E}$$

и постоянные времени в секундах:

$$T_2 = \frac{L_2}{r_2};$$

T_M берется из позиции 100; при этом U берется по заданию; I_2 — из позиции 2; r_2 — из позиции 23; $\Delta U_{щ}$ — из позиции 28; $\gamma_к$ — относительное перекрытие щеткой коллекторных пластин в долях коллекторного деления, которое берется из позиции 29; $e_р$ — из позиции 32; E — из позиции 46, если пуск двигателя производится при полной нагрузке на валу; L_2 — из позиции 92; $\varepsilon_{м0}$ и $\varepsilon_м$ — из позиции 99; α_0' и γ_0' — из позиции 101.

Далее нужно положить:

$u = 1$ при безреостатном пуске двигателя,

$u = -1$ при реверсе.

Параметры под синусом в уравнениях (2-10) имеют следующие значения:

$$\nu = \frac{1}{T_2'} \sqrt{\frac{T_2'}{T_M'} - \frac{1}{4}}, \text{ рад/с}; \quad \operatorname{tg} \delta' = -\frac{2(i_у - i_0)\sqrt{\frac{T_2'}{T_M'} - \frac{1}{4}}}{2i_к' - i_у - i_0}; \qquad (2\text{-}14)$$

$$\operatorname{tg}\psi' = 2\sqrt{\frac{T_2'}{T_M'} - \frac{1}{4}}.$$

Время наступления максимума пускового тока и его значение будут:

при апериодическом процессе:

$$t_m = 2{,}3 T_2' \log\left[\frac{T_м'(i_к' - i_0)}{T_2'(i_к' - i_у)}\right], \text{ с};$$

$$i_{2m} = i_у + (i_к' - i_у)\, e^{-\frac{t_m}{T_M'}} - (i_к' - i_0)\, e^{-\frac{t_m}{T_2'}}; \qquad (2\text{-}15)$$

при периодическом процессе;

$$t_m = \frac{\operatorname{arctg}\left(2\sqrt{\frac{T_2'}{T_M'} - \frac{1}{4}}\right) - \delta}{\nu} \text{ с}; \qquad (2\text{-}16)$$

$$i_{2m} = i_у + i_0' e^{-\frac{t_m}{2T_2'}} \sin(\nu t_m + \delta').$$

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАСЧЕТ СЕРИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Проектирование серии электродвигателей представляет собой значительные конструктивные, технологические, организационные и экономические выгоды. Серия электродвигателей позволяет обеспечить правильное использование в них активных материалов, провести рациональную организацию технологии производства и унификацию основных узлов и деталей этих двигателей.

При проектировании серии электродвигателей постоянного тока малой мощности должны быть заданы диапазоны мощностей и скоростей вращения этих двигателей, в которых строится шкала мощностей данной серии. Для иллюстрации в качестве примера рассматривается разработка серии малых электродвигателей постоянного тока в диапазоне мощностей от 1 до 250 Вт и скоростей вращения 4000—7500 об/мин.

Шкала мощностей данной серии двигателей во всем указанном диапазоне строится как для продолжительного, так и кратковременного режимов работы. При этом за основу разработки габаритных размеров и числа моделей электродвигателей серии исходной принята шкала мощностей для продолжительного режима работы.

На основе полученных в этом случае моделей электродвигателей можно построить аналогичную шкалу мощностей для любого кратковременного или повторно-кратковременного режима работы.

Вся серия электродвигателей диапазона мощностей от 1 до 250 Вт в рассматриваемом примере принята в двухполюсном исполнении. При этом шкала мощностей строится с учетом коэффициентов нарастания мощностей 1,5 — 1,6 по ГОСТ 8032—56 (приложение VII). В связи с этим шкала мощностей в диапазоне 1—250 Вт получилась в виде следующего стандартного ряда чисел с корректировкой по международной шкале мощностей: 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 90; 120; 180; 250 Вт. Этот ряд мощностей двигателей продолжительного режима можно попарно построить на шести габаритах или диаметрах якоря по две длины пакета на каждом при заданном диапазоне скоростей 4000—7500 об/мин. При разных скоростях вращения по заданию мощности двигателей возрастают примерно пропорционально этим скоростям с округлением до значений стандартных чисел принятого ряда мощностей, как показано в табл. 3.1. В результате такого расчета в этой таблице получено 12 моделей, охватывающих 36 мощностей электродвигателей продолжительного режима работы и почти столько же других мощностей двигателей кратковременного режима работы.

Диаметры $D_{н2}$ и длины l_0 якорей разных габаритов данной серии электродвигателей, указанные в табл. 3.1, определялись на основании эффективной машинной постоянной

$$C_B = \frac{D_{н2}^3 l_0 n}{P_a} = \frac{3{,}82 p 10^4}{\alpha B_\delta A_{2s}}, \qquad (3\text{-}1)$$

Таблица 3.1

№ габарита	Диаметр и число пазов якоря	Длина якоря l_a, см	Коллектор		Режим работы	Мощность, Вт, при скорости вращения, об/мин		
			Диаметр, см	Число пластин		4000	6000	7500
1	$D_{н2} = 1,55$ см, $z_2 = 9$	2,0	1,4	18	П	1	1,6	2,5
					К	2	3	5
		3,0			П	1,6	2,5	4,0
					К	3	5	8
2	$D_{н2} = 1,95$ см, $z_2 = 9$	2,0			П	2,5	4	6
					К	5	8	12
		3,0			П	4	6	10
					К	8	12	20
3	$D_{н2} = 2,45$ см, $z_2 = 11$	2,0	2,0	22	П	6	10	16
					К	12	20	32
		3,0			П	10	16	25
					К	20	32	50
4	$D_{н2} = 3,15$ см, $z_2 = 11$	2,0			П	16	25	40
					К	32	50	80
		3,0			П	25	40	60
					К	50	80	120
5	$D_{н2} = 3,53$ см, $z_2 = 13$	3,0	2,6	26	П	40	60	90
					К	80	120	180
		4,5			П	60	90	120
					К	120	180	240
6	$D_{н2} = 4,13$ см, $z_2 = 13$	4,5			П	90	120	180
					К	180	240	—
		7,0			П	120	180	250
					К	240	—	—

где расчетная или внутренняя мощность электродвигателя продолжительного режима работы, согласно позиции 1 гл. I составляет:

$$P_a = EI_2 = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_2, \text{ Вт}, \quad (3\text{-}2)$$

при этом P_2 — полезная мощность на валу двигателя, Вт; η — к. п. д., определяемый по кривым рис. 1.1 в зависимости от полезной мощности и режима работы двигателя; n — скорость вращения двигателя, об/мин; $\alpha = 0{,}60 \div 0{,}70$; B_δ — индукция в воздушном зазоре, Т, определяемая по кривым рис. 1.2 в зависимости от отношения P_2/n и режима работы двигателя; $A_{2s} = A_2/\tau_2$ — модуль линейной нагрузки якоря, при этом A_2 определяется также по кривым рис. 1.2; τ_2 — полюсный шаг, см.

Для определения диаметров якорей отдельных габаритов серии двигателей прежде всего выбирается наименьший внутренний диаметр полюсов магнитной системы двигателя первого габарита $D'_{п1}$ по технологическим или другим соображениям, с учетом ГОСТ 6636—69 (приложение VIII). Тогда диаметр якоря первого габарита

$$D'_{н2} = D'_{п1} - 2\delta, \text{ см}, \quad (3\text{-}3)$$

где δ — длина одностороннего воздушного зазора между внутренней поверхностью полюсов и якорем, см.

Для определения двух длин l'_{01} и l''_{01} пакетов якоря при наименьшей по заданию скорости вращения n следует обеспечить требуемые по шкале при этой скорости первые две полезные мощности двигателей первого габарита P'_2 и P''_2. Для этого вычисляются значения расчетных мощностей (в ваттах) по уравнению (3-2):

$$P'_{a1} = \frac{1+2\eta'}{3\eta'} P'_2;$$

$$P''_{a1} = \frac{1+2\eta''}{3\eta''} P''_2, \quad (3\text{-}4)$$

где η' и η'' берутся по кривым рис. 1.1 в зависимости от мощностей P'_2 и P''_2.

Из уравнения (3-1) с учетом (3-3) определяются длины пакетов якоря (в сантиметрах) первого габарита:

$$l'_{01} = \frac{C_B P'_{a1}}{D'^3_{н2} n}; \quad l''_{01} = \frac{C_B P''_{a1}}{D'^3_{н2} n}, \quad (3\text{-}5)$$

где $D'_{н2}$ — принятый наименьший диаметр якоря, см; при этом полученные длины l'_{01} и l''_{01} округляются до ближайшей стандартной величины по ГОСТ 6636—69 (приложение VIII).

Следующий габарит двигателей по шкале мощностей определяется из условия, чтобы мощность «короткой» машины по длине

пакета якоря данного габарита равнялась мощности «длинной» машины предыдущего габарита, умноженной на коэффициент нарастания мощностей с учетом обеспечения требуемой полезной мощности по шкале

$$P'_{a2}=k_p P''_{a1}=\frac{1+2\eta'}{3\eta'}P'_2,\ \text{Вт}, \qquad (3\text{-}6)$$

где P'_2 — полезная мощность двигателя по шкале для первой длины данного габарита, Вт.

Тогда внутренний диаметр полюсов данного габарита при $l'_{02}=l'_{01}$ будет

$$D''_{п1}=\sqrt[3]{\frac{C_B P'_{a2}}{n l'_{02}}},\ \text{см}. \qquad (3\text{-}7)$$

Этот диаметр округляется до ближайшей стандартной величины по ГОСТ 6636—69.

Диаметр якоря второго габарита

$$D''_{н2}=D''_{п1}-2\delta,\ \text{см}. \qquad (3\text{-}8)$$

При определении второй длины пакета якоря данного габарита при заданной скорости вращения n для получения требуемой полезной мощности по шкале P''_2 необходимо найти расчетную мощность по уравнению (3-2):

$$P''_{a2}=\frac{1+2\eta''}{3\eta''}P''_2,\ \text{Вт}, \qquad (3\text{-}9)$$

где η'' берется по кривым рис. 1.1 в зависимости от P''_2.

Тогда вторая длина пакета якоря данного габарита по уравнению (3-1) будет

$$l''_{02}=\frac{C_B P''_{a2}}{D''^3_{н2} n},\ \text{см}. \qquad (3\text{-}10)$$

Аналогичным способом определяются и все остальные габариты серии электродвигателей постоянного тока до наибольшего значения мощности принятой шкалы.

III. Расчет габаритов серии электродвигателей постоянного тока продолжительного режима работы по шкале мощностей табл. 3-1

Для двигателей постоянного тока продолжительного режима работы при двухполюсном исполнении в данном примере (табл. 3.1) в среднем принято:

$$\alpha=0{,}67;\ B_\delta=0{,}35\ \text{Т};\ A_{2s}=\frac{A_2}{\tau_2}=16,$$

тогда эффективная машинная постоянная серии двигателей по уравнению (3-1) получается

$$C_B=\frac{D^3_{н2} l_0 n}{P_a}=\frac{3{,}82\cdot 1\cdot 10^4}{0{,}67\cdot 0{,}35\cdot 16}\approx 10\,000.$$

Примем длину δ одностороннего воздушного зазора между поверхностью полюсных наконечников и якорем для первых четырех габаритов двигателей серии равной 0,025 см и для последующих — 0,035 см.

Первый габарит. Наименьшим внутренним диаметром полюсов двигателя данной серии по технологическим соображениям и с учетом ГОСТ 6636—69 (приложение VIII) можно принять величину $D'_{п1} = 1{,}6$ см. Следовательно, диаметр якоря $D'_{я2} = D'_{п1} - 2\delta = 1{,}6 - 2 \cdot 0{,}025 = 1{,}55$ см, что соответствует минимальному диаметру коллектора $D_к = 1{,}4$ см и рациональному раскрою стандартного листа электротехнической стали размером $1{,}0 \times 2{,}0$ м. В этом случае получается минимум отходов при штамповке дисков якоря из нарезанных полос листа. Ширина полосы должна быть на 0,5 — 0,6 см больше диаметра якоря.

Далее, в соответствии с уравнениями (3-4) и (3-5) при $P'_2 = 1$ Вт и $P''_2 = 1{,}6$ Вт ($n = 4000$ об/мин) получается:

$$P'_{a1} = \frac{1+2 \cdot 0{,}14}{3 \cdot 0{,}14} \cdot 1 \approx 3 \text{ Вт}; \quad P''_{a1} = \frac{1+2 \cdot 0{,}16}{3 \cdot 0{,}16} \cdot 1{,}6 \approx 4{,}4 \text{ Вт}.$$

Длины пакетов якорей первого габарита при $n = 4000$ об/мин:

$$l'_{01} = \frac{10\,000 \cdot 3}{1{,}55^3 \cdot 4000} = 2{,}0 \text{ см}; \quad l''_{01} = \frac{10\,000 \cdot 4{,}4}{1{,}55^3 \cdot 4000} \approx 3{,}0 \text{ см},$$

что соответствует ГОСТ 6636—69.

Второй габарит. Расчетные мощности двигателей второго габарита по уравнениям (3-6) и (3-9) будут:

$$P'_{a2} = \frac{1+2 \cdot 0{,}18}{3 \cdot 0{,}18} \cdot 2{,}5 - 6{,}3 \text{ Вт}; \quad P''_{a2} = \frac{1+2 \cdot 0{,}22}{3 \cdot 0{,}22} \cdot 4 \approx 8{,}8 \text{ Вт}.$$

Внутренний диаметр полюсов второго габарита при $l'_{02} = 2{,}0$ см по уравнению (3-7)

$$D''_{п1} = \sqrt[3]{\frac{10\,000 \cdot 6{,}3}{4000 \cdot 2{,}0}} = 2{,}0 \text{ см},$$

что соответствует ГОСТ 6636—69; а диаметр якоря данного габарита по уравнению (3-8):

$$D''_{я2} = 2{,}0 - 2 \cdot 0{,}025 = 1{,}95 \text{ см}.$$

Вторая длина пакета якоря второго габарита по уравнению (3-10) получается

$$l''_{02} = \frac{10\,000 \cdot 8{,}8}{1{,}95^3 \cdot 4000} \approx 3{,}0 \text{ см}.$$

Аналогичным способом получены данные и остальных габаритов рассматриваемой серии двигателей постоянного тока, представленных в табл. 3.1. В результате такого расчета, как видно из табл. 3.1, вся шкала мощностей рассматриваемой в качестве при-

мера серии двигателей от 1 до 250 Вт оказалась построенной на шести диаметрах якорей по две длины в каждом.

В табл. 3.2 приведены габариты серии двигателей, рассмотренных в примере.

Таблица 3-2

№ габарита	Диаметр якоря $D_{н2}$, см	Длина якоря l_0, см	Воздушный зазор δ, см	Внутренний диаметр полюсов $D_{п}$, см	Ширина полосы, см	Количество полос из листа, шт.
1	1,55	2; 3	0,025	1,6	2,08	48
2	1,95	2; 3	0,025	2,0	2,50	40
3	2,45	2; 3	0,025	2,5	3,13	33
4	3,15	2; 3	0,025	3,2	3,85	26
5	3,53	3, 0; 4, 5	0,035	3,6	4,16	24
6	4,13	4. 5; 7, 0	0.035	4,2	4,76	21

Из таблицы видно, что при принятой длине одностороннего воздушного зазора для первых четырех габаритов $\delta = 0{,}025$ см и последних двух — 0,035 см, внутренние диаметры полюсов соответственно получились 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 3,6 и 4,2 см, что полностью совпадает с нормальными диаметрами калибровых пробок для контроля этих размеров при изготовлении машин.

112. Шкала мощностей электродвигателей кратковременного режима работы

Для электродвигателей постоянного тока кратковременного режима работы до пяти минут при двухполюсном исполнении в данном примере в среднем принято:

$$\alpha = 0{,}67;\ B_\delta = 0{,}4\ \text{Т};\ A_{2s} = \frac{A_2}{\tau_2} = 28,$$

тогда эффективная машинная постоянная

$$C_B = \frac{D^3_{н2} l_0 n}{P_в} = \frac{3{,}82\cdot 1\cdot 10^4}{0{,}67\cdot 0{,}4\cdot 28} \approx 5000.$$

Следовательно, мощность двигателя кратковременного режима работы до пяти минут при соответствующем габарите будет примерно вдвое больше мощности двигателя продолжительного режима того же габарита. Шкала мощностей этих двигателей в диапазоне от 1 до 250 Вт представлена в табл. 3.1.

Таким образом, серия электродвигателей малой мощности, разработанная для определенного заданного диапазона мощностей и скоростей вращения, позволяет при ограниченном числе моделей двигателей охватить большой диапазон мощностей как продолжительного, так и кратковременного режима работы, значительно унифицировать основные узлы и детали двигателей и упростить их технологию изготовления.

При выборе числа и формы пазов якорей серии электродвигателей необходимо учитывать ряд факторов, по-разному влияющих на решение данного вопроса. Например, с увеличением до некоторого значения числа пазов на пару полюсов начинает уменьшаться эффективность использования активных материалов машины, так как при большом числе пазов относительно возрастает площадь, занимаемая изоляцией, и, следовательно, относительно уменьшается полезная площадь для меди. В малых машинах, кроме того, при увеличенном числе пазов якоря приходится уменьшать их глубину, так как получающееся узкое клиновидное пространство на дне паза не может быть использовано для размещения проводников. Наконец, при большом числе пазов якоря возникает также проблема механической прочности зубцов. По соображениям этой прочности не следует практически допускать толщину зубца якоря менее 1 мм.

Следует отметить, что при выборе числа пазов якоря в малых машинах основное внимание должно быть уделено уменьшению их массы и габаритов. Это обусловливает выбор относительно небольшого числа пазов, составляющего на пару полюсов от 7 до 15.

В целях уменьшения пульсаций и ослабления явления «прилипания» якоря к полюсным наконечникам число пазов в данной серии принято нечетным и равным: на первых двух диаметрах — 9, на вторых двух — 11 и на остальных — 13 (табл. 3.1).

Число коллекторных пластин для каждого из указанных габаритов электродвигателей в соответствии с выбранным числом пазов якорей получилось 18, 22 и 26. Диаметры коллекторов выбраны: 1,4 см — для первого и второго габаритов, 2,0 см — для третьего и четвертого и 2,6 см — для остальных габаритов. Таким образом, на 12 моделей электродвигателей данной серии имеется всего только три типа коллектора.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РАСЧЕТ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

4-1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В настоящее время постоянные магниты широко используются для возбуждения электродвигателей и генераторов постоянного тока малой мощности.

Применение постоянных магнитов для возбуждения этих машин позволяет:

а) упростить конструкцию машины и уменьшить ее габариты при малых мощностях за счет отсутствия катушек возбуждения;

б) повысить к. п. д. машины благодаря отсутствию потерь энергии на возбуждение;

в) уменьшить нагревание машины по сравнению с машинами, возбуждаемыми электромагнитами.

Уменьшение массы (веса) и габарита, а также увеличение к. п. д. машины имеет большое значение для установок, в которых мощность источника энергии ограничена.

Материалы для постоянных магнитов представляют собой сплавы железа, никеля, алюминия и меди, иногда с примесью кобальта, хрома, вольфрама, титана.

Качество сплава для постоянных магнитов определяется так называемой кривой размагничивания. Эта кривая является частью петли гистерезиса, расположенной во втором квадранте координатных осей — между положительной осью индукции B и отрицательной осью напряженности магнитного поля H. Она представляет собой зависимость между остаточной индукцией и размагничивающей силой сплава (рис. 4.1). Если по осям координат откладывать для разных по составу и качеству сплавов не абсолютные значения B и H, а отношения B/B_r и H/H_c, то для данного сплава получается так называемая «приведенная» кривая размагничивания.

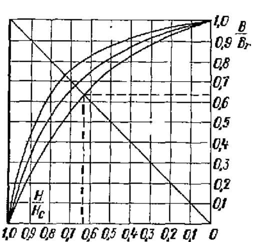


Рис. 4.1. Приведенные кривые размагничивания сплавов для постоянных магнитов

При этом B_r — остаточная индукция, получаемая в замкнутом кольце или бесконечно длинном прямом магните при уменьшении напряженности магнитного поля с максимального значения до нуля, Т; H_c — коэрцитивная сила, необходимая для уменьшения индукции в магните от величины B_r до 0, А/см; B — значение остаточной индукции в магните при некоторой напряженности размагничивающего поля H, Т; H — напряженность размагничивающего поля, действующая на магнит, А/см; она может быть вызвана или внешним размагничивающим полем, или действием свободных концов магнита при конечной длине его.

Для разных по составу сплавов начальные и конечные точки «приведенной» кривой размагничивания совпадают, но выпуклости кривых будут различными (рис. 4.1). Для расчета постоянных магнитов необходимо иметь эту кривую или ее аналитическое выражение. Наиболее распространенной аппроксимирующей формулой кривой размагничивания в относительных единицах является следующая [18]:

$$b = \frac{1-h}{1-ah}, \qquad (4\text{-}1)$$

где коэффициент выпуклости этой кривой имеет значение

$$a=2\sqrt{\frac{1}{b_d h_d}-\frac{1}{b_d h_d}}, \qquad (4\text{-}2)$$

здесь $b = B/B_r$ и $h = H/H_c$ — текущие значения индукции в магните и напряженности размагничивающего поля в относительных единицах; $b_d = B_d/B_r$ и $h_d = H_d/H_c$ — координаты точки приведенной кривой размагничивания, определяющей максимум отдаваемой магнитом энергии в пространство; при этом B_r — остаточная индукция в нейтральном сечении магнита, Т; H_c — коэрцитивная сила, А/см.

Другой важной характеристикой качества сплава для постоянных магнитов является величина удельной магнитной энергии, развиваемой в окружающем пространстве единицей объема магнита. Эта энергия в джоулях на 1 см³ выражается, как известно, соотношением $\frac{BH}{2}\cdot 10^{-4}$.

Параметры литых сплавов соответствующих марок для постоянных магнитов, а именно: индукция B_r, напряженность магнитного поля H_c и максимальная удельная магнитная энергия $(BH)_{макс}/2$ нормируются ГОСТ 17809—72 (приложение V).

Следует отметить, что магнитное поле постоянного магнита с течением времени изменяется под действием внешних условий: температуры, радиации, механических нагрузок, внешнего магнитного поля и др.

Различают структурную и магнитную нестабильность магнита. Структурная нестабильность обычно связана с изменением кристаллического строения магнита, а магнитная нестабильность его представляет собой процесс магнитного старения.

Магнитное старение магнита происходит приблизительно по логарифмическому закону и зависит от формы кривой размагничивания, относительных размеров магнита, температуры и т. п. Количественно это старение в зависимости от марки сплава характеризуется величиной от десятых долей процента до нескольких процентов в год.

Основными методами магнитной стабилизации магнита являются частичное размагничивание его и обработка температурными циклами. Частичное размагничивание магнита состоит в том, что намагниченный магнит подвергают воздействию переменного поля с убывающей до нуля амплитудой. При температурной обрвботке магнита его 3—5 раз нагревают и охлаждают до температуры несколько выше и ниже ожидаемой при эксплуатации.

4-2. КОНСТРУКЦИИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ МАЛЫХ МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ И РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В ЭТИХ МАШИНАХ

Конструкция магнитной системы малой машины постоянного тока с возбуждением постоянными магнитами принципиально не отличается от конструкции машины с электромагнитным возбужде-

нием. В ней отсутствуют лишь катушки возбуждения на полюсах. Наиболее употребительные из этих конструкций представлены на рис. 4.2.

В одних конструкциях постоянные магниты располагаются радиально и имеют форму параллелепипедов, прикрепляемых к стальной станине (рис. 4.2, *а*), в других — форму дуг или скоб, скрепляющих два полюса из мягкой стали в алюминиевом корпусе, (рис. 4.2, *б*), в третьих — в виде кольца, намагниченного по диаметру (рис. 4.2, *в*).

Магнитные системы малых машин постоянного тока с радиальными (рис. 4.2, *а*) и кольцевыми (рис. 4.2, *в*) магнитами выполняются как двух-, так и четырехполюсными, а системы с дугообразными магнитами (рис. 4.2, *б*) — обычно двухполюсными.

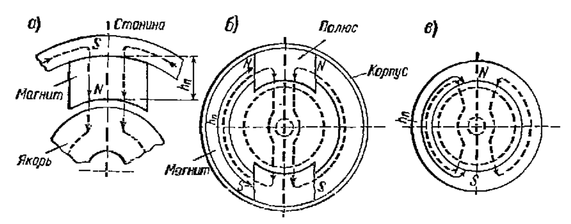


Рис. 4.2. Конструкции магнитных систем малых машин с постоянными магнитами: *а* — радиальный магнит в форме параллелепипеда; *б* — в форме дуг или скоб; *в* — кольцевой магнит

Что касается влияния поперечной м. д. с. реакции якоря на магнитное поле постоянных магнитов рассматриваемых машин, то при номинальном режиме работы этим влиянием практически можно пренебречь. Это обусловлено тем, что относительная магнитная проницаемость материала магнитов мала, превышая лишь в несколько раз проницаемость воздуха. Следовательно, поперечная м. д. с. якоря при номинальном токе машины не может создать сколько-нибудь заметной величины поперечного поля якоря. Однако при больших кратностях тока якоря по отношению к номинальному, например при работе двигателя малой мощности в реверсивном режиме, влияние поперечной м. д. с. якоря на магнитное поле постоянного магнита может быть заметным. Действительно при реверсе двигателя ток якоря после изменения своего направления может достигать почти двойной величины тока короткого замыкания: $I_{2m} \approx \frac{-U-E}{r_2} \approx -2\frac{U}{r_2} \approx -2I_{2к}$, где $I_{2к} = \frac{U}{r_2}$ — ток короткого замыкания, А; U — напряжение на зажимах якоря, В; r_2 — общее сопротивление обмотки якоря и щеточных контактов, Ом.

Это обусловливает многократное увеличение поперечной составляющей м. д. с. якоря по отношению к номинальной величине и изменение направления ее действия на обратное. Следовательно, при расчете реверсивных двигателей с постоянными магнитами нужно считаться с влиянием поперечной м. д. с. якоря на размагничивание магнитов. В остальных же случаях при расчете машин с постоянными магнитами достаточно учитывать только влияние продольной и коммутационной м. д. с. якоря на поле магнитов. Для учета этого влияния служит кривая размагничивания магнита (рис. 4.3).

Если постоянный магнит намагничен в собранной машине, то рабочая точка магнита K при нагрузке машины лежит на кривой размагничивания (рис. 4.3). Если же он намагничен в отдельности от машины и вставлен в ее магнитную систему в намагниченном состоянии, то рабочая точка магнита T лежит на так называемой прямой возврата LQ. Под прямой возврата понимается средняя прямая, заменяющая узкую петлю гистерезиса частичного цикла размагничивания и намагничивания магнита под действием внешнего магнитного поля. Точный наклон прямой возврата к оси абсцисс для каждой марки сплава магнита определяется

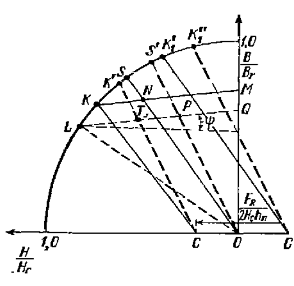


Рис. 4.3. Учет размагничивающего действия м. д. с. якоря

опытным путем. Однако при расчете постоянных магнитов для возбуждения малых машин наклон прямой возврата можно с достаточной точностью положить параллельным касательной к кривой размагничивания в точке пересечения последней с осью ординат. В приближенных расчетах этих магнитов можно тангенс угла ψ наклона прямой возврата к оси абсцисс без большой погрешности принять в пределах 0,2 — 0,3 или угол $\psi = 12 \div 16°$.

Учет размагничивающего действия продольной и коммутационной м. д. с. якоря на поле магнита показан на рис. 4.3. В нем сплошные прямые относятся к случаю намагничивания магнита в собранной машине, а штриховые — при намагничивании его отдельно от машины, при этом KM и LQ — прямые возврата; OS и OS' — линии проводимости собранной машины без учета насыщения ее магнитной системы; OL — линия проводимости магнита при отсутствии якоря в системе; отрезок OC — продольная и коммутационная м. д. с. якоря в относительных единицах $\frac{F_R}{2H_c h_п}$; CK и CK' — линии, параллельные соответственно OS и OS'. В результате этих по-

строений рабочими точками магнита при холостом ходе и нагрузке машины будет соответственно в первом случае — точки N и K, а во втором P и T.

Следует отметить, что в нереверсивных малых двигателях постоянного тока продольная и коммутационная м. д. с. якоря усиливают поле магнитов. Поэтому при учете их подмагничивающего действия на магнит нужно отрезок OC на рис. 4.3 отложить вправо от точки O и провести затем линии $C'K_1'$ или $C'K_1''$ параллельно соответственно OS и OS'. В случае же реверсивного двигателя коммутационная м. д. с. якоря, вследствие изменения направления тока якоря при реверсе, ослабляет поле магнита и имеет значительную величину. Следовательно, при учете м. д. с. якоря в этом случае нужно отрезок OC откладывать влево от точки O (рис. 4.3).

Таким образом, под влиянием размагничивающего или подмагничивающего действия м. д. с. якоря происходит изменение магнитного состояния постоянных магнитов. В связи с этим для обеспечения постоянства свойств в работе машин, возбуждаемых постоянными магнитами, следует до начала эксплуатации машины подвергнуть ее воздействию максимальной м. д. с. якоря путем возможно большей перегрузки ее в соответствующем режиме работы.

Так, например, генератор наибольшую перегрузку по току будет иметь при коротком замыкании, реверсивный двигатель — при работе в реверсивном режиме и нереверсивный двигатель — при безреостатном пуске и коротком замыкании. Таким перегрузочным режимам работы машина должна подвергаться несколько раз, чтобы стабилизировать магнитное поле постоянных магнитов. Вообще для получения максимальной отдачи магнитной энергии магнитами в воздушный зазор машины желательно намагничивать их в собранном в машине состоянии.

4-3. ПОРЯДОК РАСЧЕТА МАШИН С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Расчет малых машин постоянного тока с постоянными магнитами в основном производится, так же как и рассмотренных выше машин постоянного тока параллельного или независимого возбуждения, по формулам позиций 1—46 и 60—68 гл. 1.

Особенностью расчета здесь является лишь проверка или уточнение предварительной высоты (длины) полюса $h_п$ постоянного магнита, принятой в эскизе магнитной системы позиции 37 гл. 1 при заданном наружном диаметре станины машины. Эта проверка производится с помощью приведенной кривой размагничивания рис. 4.7 и кривой намагничивания машины, получаемой в позиции 44 гл. 1. Вместе с тем при определении основных размеров машины с постоянными магнитами — диаметра и длины пакета якоря $D_{н2}$ и l_0 - необходимо иметь в виду следующий порядок выбора к. п. д. и индукции в воздушном зазоре (кривые на рис. 1.1 и 1.2).

При выборе в позиции 1 к. п. д. машины η (кривые на рис. 1.1) нужно соответствующие значения его, получаемые по этим кривым, увеличивать на 15—20%.

При выборе в позиции 3 индукции B_δ в воздушном зазоре этой машины (кривые на рис. 1.2) нужно учитывать, что при максимальной отдаваемой энергии постоянным магнитом в воздушном зазоре индукция составляет величину порядка $B_\delta \leqslant 0{,}65\ B_r$, где B_r — остаточная индукция постоянного магнита, выбираемая в зависимости от марки сплава по данным ГОСТ 17809—72 на магнитнотвердые материалы (приложение V).

4-4. ПРОВЕРКА ДЛИНЫ ПОСТОЯННОГО МАГНИТА ПОЛЮСА МАШИНЫ

Для проверки длины или высоты постоянного магнита полюса машины $h_п$ (рис. 4.2) используются приведенная кривая размагничивания сплава (рис. 4.1) и кривая намагничивания машины. С этой целью выбирается марка сплава для магнита по ГОСТ 17809—72 с определенными значениями остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c (приложение V), и по уравнениям (4-1) и (4-2), строится приведенная кривая размагничивания в относительных единицах (рис. 4.7).

Расчет магнитной системы машины с постоянными магнитами в целях проверки или уточнения размеров последних связан не только с построением кривой размагничивания (рис. 4.7), но также и определением магнитных проводимостей воздушных путей замыкания поля магнитов в системе. При этом для упрощения расчета этих проводимостей считают, что распределение магнитного потенциала вдоль высоты (длины) магнита линейно, а магнитное сопротивление самой системы равно нулю. Тогда при таком допущении в случае, например, радиальных магнитов в системе в виде параллелепипедов (рис. 4.2, *а*) нейтральное сечение каждого из них практически будет находиться в месте стыка его со станиной, а в дугообразных и кольцевых магнитах (рис. 4.2, *б* и *в*) это сечение находится на диаметральной линии системы, перпендикулярной продольной оси машины. При указанном допущении задача сводится к расчету электрической цепи, состоящей из генератора с нелинейной внешней характеристикой, работающего практически на линейную нагрузку. Аналогом внешней характеристики генератора здесь является кривая размагничивания магнитов (рис. 4.1 и 4.7), а характеристикой линейной нагрузки служит прямая полной проводимости для поля вне магнитов. В этом случае по закону Ома для магнитной цепи на пару полюсов можно написать следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
\Phi_м &= \Lambda F_м = B_м Q_м 10^{-4},\ \text{Вб};\\
F_м &= 1{,}6 B_\delta \delta' \cdot 10^4 = 2H_р h_п,\ \text{А};\\
\Delta F_м &= 2H_м h_п,\ \text{А};\\
F &= 2H_c h_п = F_м + \Delta F_м,\ \text{А},
\end{aligned} \qquad (4\text{-}3)$$

где $\Phi_м$, $B_м$, $H_м$ — магнитное поле, индукция и напряженность поля в нейтральном сечении магнита, соответственно Вб, Т и А/см; B_δ — индукция в воздушном зазоре машины, Т; H_p — напряженность внешнего размагничивающего поля, А/см; $\delta' = k_\delta \delta$ — расчетная длина одностороннего воздушного зазора, см; $F_м$ — м. д. с., действующая между двумя полюсами магнитов системы, А; $\Delta F_м$ — падение м. д. с. в материале магнитов на пару полюсов, А; F — полная м. д. с. магнитов на пару полюсов, А; Λ — полная магнитная проводимость воздушных путей для поля, Вб/А; $h_п$ — высота (длина) одного магнита, см; $Q_м$ — площадь нейтрального поперечного сечения магнита, см².

Магнитная проводимость Λ силовой трубки магнитного поля в воздухе может быть представлена приближенно в виде:

$$\Lambda = \mu_0 \frac{Q_{ср}}{l_{ср}}, \text{ Вб/А}, \quad (4\text{-}4)$$

где $\mu_0 = 0{,}4\,\pi \cdot 10^{-8}$ — магнитная проницаемость вакуума, Г/см; $Q_{ср}$ — средняя величина площади поперечного сечения силовой трубки, см²; $l_{ср}$ — средняя длина силовой трубки в воздухе, см.

Ниже производится расчет магнитной системы машины постоянного тока при условии намагничивания магнитов в собранном виде совместно с системой.

Если магнитная система машины имеет радиальные, дугообразные или кольцевой магниты, как это представлено на рис. 4.2, то для намагничивания магнитов в систему вместо якоря вставляют намагничивающее устройство. Оно состоит из шихтованного стального цилиндра наподобие якоря с одной катушкой в диаметральных пазах — при двухполюсном исполнении, или с двумя катушками на одной четверти окружности цилиндра каждая — при четырехполюсном исполнении машины. В процессе намагничивания магнитов в эти катушки кратковременно подается несколько раз значительный ток от специальной импульсной установки. После этого намагничивающее устройство постепенно извлекают из магнитной системы машины и одновременно вставляют на его место якорь с обмоткой, с тем чтобы полюсы магнитов были непрерывно замкнутыми на стальной цилиндр вынимаемого устройства и вставляемого якоря.

При расчете магнитной системы машины определяют величину магнитной проводимости воздушного зазора на пару полюсов при наличии якоря в системе по уравнению (4-4):

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{Q_\delta}{2\delta'}, \text{ Вб/А}, \quad (4\text{-}5)$$

где $\delta' = k_\delta \delta$ — расчетная длина одностороннего воздушного зазора, см; $Q_\delta = b_0 l_0$ — площадь воздушного зазора под полюсом, см²; при этом b_0 — расчетная полюсная дуга, см; l_0 — длина пакета якоря, см.

Затем определяют магнитные проводимости рассеяния $\Lambda_{\sigma 1}$, $\Lambda_{\sigma 2}, \ldots, \Lambda_{\sigma m}$ между отдельными боковыми сторонами магнитов в системе и полную магнитную проводимость Λ_σ всех воздушных путей замыкания полей рассеяния магнитов на пару полюсов по формуле

$$\Lambda_\sigma = k_0 (\Lambda_{\sigma 1} + \Lambda_{\sigma_2} + \ldots + \Lambda_{\sigma m}), \text{ Вб/А}, \quad (4\text{-}6)$$

где $k_0 = 0{,}5$ — коэффициент, учитывающий линейное падение м. д. с. вдоль высоты (длины) магнита.

Вид и количество формул для определения частичных проводимостей рассеяния $\Lambda_{\sigma 1}$, $\Lambda_{\sigma 2}$ и т. д. существенно зависит от конфигурации магнитов и конструкции магнитной системы машины. В общем случае определение проводимостей рассеяния в машинах обычно производится методом разбивки магнитного поля магнитов на элементарные силовые трубки по вероятным путям замыкания их в воздухе. Число этих трубок для определения проводимостей рассеяния зависит от конфигурации магнитов в системе. Такой графо-аналитический метод расчета этих проводимостей является довольно приближенным и трудоемким. Лишь в некоторых частных случаях простейших форм магнитов возможен аналитический расчет проводимостей рассеяния по приближенным формулам [16 и 18].

Ниже приводятся графо-аналитический метод расчета проводимостей рассеяния на пару полюсов для магнитной системы машины с радиальными магнитами в виде параллелепипедов (рис. 4.2, *а*) и системы с кольцевым магнитом (рис. 4.2, *в*).

Магнитная система машины с радиальными магнитами (рис. 4.4)

На рис. 4.4 представлена примерная картина распределения магнитных полей рассеяния в системе машины с радиальными магнитами — между боковыми $\Phi_{\sigma 2}$ и торцевыми $\Phi_{\sigma 3}$ сторонами магнитов и внутренней поверхностью станины.

Среднюю магнитную проводимость для полей рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ между боковой стороной магнита и станиной в соответствии с уравнением (4-4) можно представить в виде:

$$\Lambda_{\sigma 2} = \mu_0 \frac{Q_2}{l_{\text{ср}2}}, \text{ Вб/А}, \quad (4\text{-}7)$$

при этом площадь боковой стороны магнита $Q_2 = h_\text{п} l_\text{п}$, см², где $l_\text{п}$ — длина магнита по оси вала машины (рис. 4.4), см. Средняя длина силовой трубки бокового поля рассеяния между этой стороной и станиной будет $l_{\text{ср}2} \approx 0{,}5 \frac{\pi}{2} h_\text{п}$, см. С учетом этих значений Q_2 и $l_{\text{ср}2}$ уравнение (4-7) принимает следующий окончательный вид:

$$\Lambda_{\sigma 2} = \mu_0 \frac{4}{\pi} l_\text{п}, \text{ Вб/А}. \quad (4\text{-}8)$$

Аналогично средняя магнитная проводимость между торцевой стороной магнита и станиной будет

$$\Lambda_{\sigma 3}=\mu_0 \frac{Q_3}{l_{ср3}}, \text{ Вб/А}, \quad (4\text{-}9)$$

при этом средняя площадь торцевой стороны магнита (рис. 4.4)

$$Q_3=\beta \frac{1}{2}(D_{п1}+h_п)h_п, \text{ см}^2,$$

где β — центральный угол радиального магнита (рис. 4.4), рад. Среднюю длину силовой трубки торцевого поля рассеяния можно

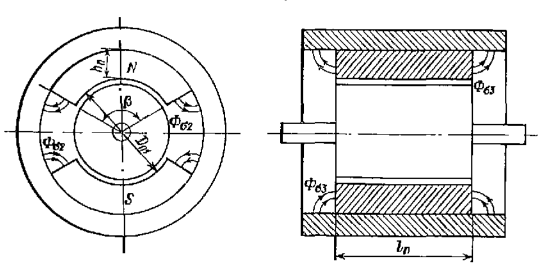


Рис. 4.4. Примерная картина распределения полей рассеяния в машине с радиальными постоянными магнитами

положить $l_{ср3}\approx l_{ср2}=0,5\frac{\pi}{2}h_п$, см. Тогда уравнение (4-9) принимает следующий окончательный вид:

$$\Lambda_{\sigma 3}=\mu_0 \frac{2}{\pi}\beta(D_{п1}+h_п), \text{ Вб/А}, \quad (4\text{-}10)$$

Полная магнитная проводимость Λ_σ всех воздушных путей замыкания полей рассеяния магнитов в системе рис. 4.4 на пару полюсов с учетом уравнения (4-6) будет

$$\Lambda_\sigma=\frac{1}{2}k_0(2\Lambda_{\sigma 2}+2\Lambda_{\sigma 3})=0,5(\Lambda_{\sigma 2}+\Lambda_{\sigma 3}), \text{ Вб/А}. \quad (4\text{-}11)$$

Магнитная проводимость воздушного зазора машины с радиальными магнитами на пару полюсов при наличии якоря в магнитной системе и с учетом насыщения последней, а также выражения для площади воздушного зазора $Q_\delta=\alpha\frac{\pi D_{п1}}{2p}l_п$, по уравнению (4-5) будет

$$\Lambda_\delta=\mu_0 \frac{\alpha\pi}{4p}\frac{D_{п1}l_п}{k_н k_\delta \delta}, \text{ Вб/А}, \quad (4\text{-}12)$$

где $\alpha = 0{,}6 \div 0{,}7$ — коэффициент полюсного перекрытия; p — число пар полюсов машины; $k_н$ — коэффициент насыщения магнитной системы машины; k_δ — коэффициент воздушного зазора; δ — длина одностороннего воздушного зазора, см; $D_{п1}$ и $l_п$ — размеры согласно рис. 4.4, см.

Магнитную проводимость воздушного рабочего пространства машины между полюсами радиальных магнитов на пару полюсов без якоря можно с достаточным приближением представить в следующем виде:

$$\Lambda'_\delta = \mu_0 \frac{2{,}3p\beta l_п}{[2\pi(p-1)+p\beta]\,\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{2p}-\frac{\beta}{4}\right)}, \text{ Вб/А.} \quad (4\text{-}13)$$

Эту проводимость приходится вычислять в случае определения на кривой размагничивания точки отхода прямой возврата при стабилизации постоянных магнитов машины при вынутом якоре.

Магнитная система машины с кольцевым магнитом (рис. 4.5 и 4.6)

На рис. 4.5 представлена примерная картина распределения магнитных полей рассеяния в системе машины с кольцевым магнитом: $\Phi_{\sigma1}$ и $\Phi_{\sigma2}$ — поля, замыкающиеся с внешней цилиндрической

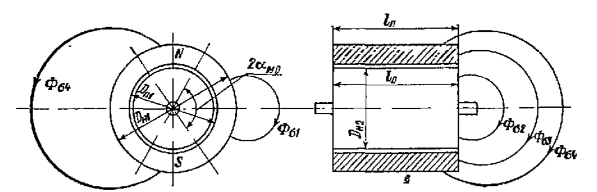


Рис. 4.5. Примерная картина распределения полей рассеяния в машине с кольцевым магнитом

и торцевой поверхностей магнита, охватываемых углом $2\alpha_{м0}$; $\Phi_{\sigma3}$ и $\Phi_{\sigma4}$ — поля торцевой и внешней цилиндрической поверхностей, соответствующих углу $(\pi - 2\alpha_{м0})$.

Для двухполюсных кольцевых магнитов в среднем можно принять угол $2\alpha_{м0} \approx \frac{2\pi}{3}$.

Анализ магнитных проводимостей указанных на рис. 4.5 путей замыкания полей рассеяния двухполюсных машин с кольцевым магнитом позволяет представить их с достаточной для практики точностью следующими приближенными уравнениями:

среднюю магнитную проводимость путей замыкания полей рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ с внешней цилиндрической поверхности магнита

$$\Lambda_{\sigma 1} \approx 0{,}3\mu_0 (D_{н1} + l_п), \text{ Вб/А}; \qquad (4\text{-}14)$$

проводимость путей замыкания полей рассеяния $\Phi_{\sigma 2}$ с торцевой поверхности магнита

$$\Lambda_{\sigma 2} \approx \mu_0 (0{,}27 D_{н1} - 0{,}04 D_{п1}), \text{ Вб/А}; \qquad (4\text{-}15)$$

проводимость путей замыкания полей рассеяния $\Phi_{\sigma 3}$ с торцевой поверхности магнита

$$\Lambda_{\sigma 3} \approx 2\mu_0 D_{н1} \frac{0{,}42 D_{н1} + 0{,}14 D_{п1}}{7 D_{н1} + D_{п1}}, \text{ Вб/А}; \qquad (4\text{-}16)$$

проводимость путей замыкания полей рассеяния $\Phi_{\sigma 4}$ с внешней цилиндрической поверхности магнита

$$\Lambda_{\sigma 4} \approx \mu_0 (0{,}14 D_{н1} + 0{,}24 l_п), \text{ Вб/А}, \qquad (4\text{-}17)$$

где $l_п$ — длина магнита по оси вала машины (рис. 4.5), см; $D_{п1}$ и $D_{н1}$ — внутренний и наружный диаметры кольцевого магнита, см; $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}$ — магнитная проницаемость вакуума, Г/см.

Полная магнитная проводимость рассеяния магнитной системы машины с кольцевым магнитом при наличии в ней якоря в соответстви с уравнением (4-6) будет

$$\Lambda_\sigma = \Lambda_{\sigma 1} + 2\Lambda_{\sigma 2} + \Lambda_{\sigma 3} + \Lambda_{\sigma 4}, \text{ Вб/А}. \qquad (4\text{-}18)$$

Магнитная проводимость воздушного зазора машины с кольцевым магнитом на пару полюсов при наличии в ней якоря и с учетом насыщения его может быть определена по уравнению (4-12).

При определении магнитной проводимости рассеяния кольцевого магнита без якоря необходимо, кроме частичных полей $\Phi_{\sigma 1}$, $\Phi_{\sigma 2}$, $\Phi_{\sigma 3}$ и $\Phi_{\sigma 4}$, учитывать также поля $\Phi_{\sigma 5}$ и $\Phi_{\sigma 6}$, замыкающиеся внутри магнита (рис. 4.6). Соответствующие магнитные проводимости можно определить с помощью следующих приближенных уравнений:

$$\Lambda_{\sigma 5} \approx \frac{1}{2} \mu_0 l_п \frac{0{,}75 D_{п1} - 0{,}1 D_{н1}}{D_{п1}}, \text{ Вб/А}; \qquad (4\text{-}19)$$

$$\Lambda_{\sigma 6} \approx \frac{1}{2} \mu_0 l_п, \text{ Вб/А}. \qquad (4\text{-}20)$$

Таким образом, магнитная проводимость воздушного пространства машины внутри кольцевого магнита на пару полюсов при отсутствии якоря будет

$$\Lambda'_\delta = 2\Lambda_{\sigma 5} + \Lambda_{\sigma 6}, \text{ Вб/А}. \qquad (4\text{-}21)$$

После определения проводимости рассеяния системы на пару полюсов Λ_σ по уравнениям (4-11) или (4-18) при наличии в ней якоря, определяют полную магнитную проводимость воздушных

путей на пару полюсов для всего поля магнитов как в рабочем воздушном зазоре машины Λ_δ, так и вне его:

$$\Lambda = \Lambda_\delta + \Lambda_\sigma, \text{ Вб/А}. \qquad (4\text{-}22)$$

На рис. 4.7 в квадранте кривой размагничивания магнитов в относительных единицах проводят прямую OA полной проводимости системы Λ с наклоном к оси абсцисс под углом

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{H_c}{B_r}\frac{2h_п}{Q_м}\Lambda \cdot 10^4, \qquad (4\text{-}23)$$

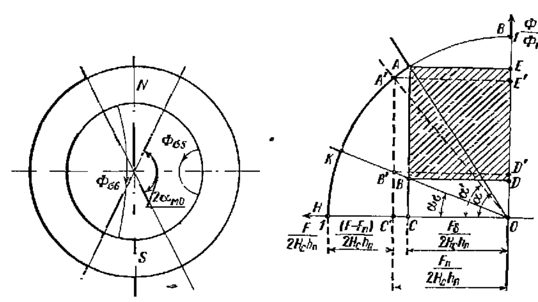


Рис. 4.6. Примерная картина распределения полей рассеяния внутри кольцевого магнита при отсутствии якоря

Рис. 4.7. Проверка правильности выбора соотношений между основными размерами магнитной системы машины

и прямую OK проводимости рассеяния Λ_σ под углом

$$\operatorname{tg}\alpha_\sigma = \frac{H_c}{B_r}\frac{2h_п}{Q_м}\Lambda_\sigma \cdot 10^4, \qquad (4\text{-}24)$$

где B_r — остаточная индукция в нейтральном сечении магнита по ГОСТ, Т; H_c — коэрцитивная сила, А/см; $h_п$ — высота (длина) одного магнита (рис. 4.2), см; $Q_м$ — поперечное сечение нейтральной зоны магнита, см^2; Λ — полная магнитная проводимость системы по уравнению (4-22), Вб/А; Λ_σ — проводимость рассеяния по уравнениям (4-11) или (4-18), Вб/А.

Ордината AC на рис. 4.7 представляет собой индукцию $B_м$ в нейтральном сечении магнитов с учетом размагничивающего действия их концов из-за наличия воздушного зазора между полюсами и якорем. Тогда величина полезного магнитного поля магнитов в воздушном зазоре машины будет

$$\Phi_\delta = B_м Q_м \frac{\Lambda_\delta}{\Lambda} \cdot 10^{-4}, \text{ Вб}. \qquad (4\text{-}25)$$

Критерием правильности выбора соотношений между основными размерами магнитной системы машины здесь служит величина магнитной энергии в воздушном зазоре. Эта величина пропорциональна площади заштрихованного прямоугольника *ABDE* и зависит от положения точки *A* на кривой размагничивания (рис. 4.7). Оптимальное положение точки *A*, соответствующее максимуму этой площади, может быть определено графически путем нескольких проб. Для этой цели нужно несколько изменять величину воздушного зазора между полюсами и якорем.

Рассмотренный выше упрощенный метод расчета магнитной системы машины с постоянными магнитами основан на допущении, что магнитное сопротивление всех ферромагнитных участков равно нулю. Однако в действительности требуемая от постоянных магнитов м. д. с. для создания полезного магнитного поля в воздушном зазоре машины должна преодолевать магнитное сопротивление не только этого зазора, но также и путей замыкания поля в станине, зубцах и сердечнике якоря. Следовательно, м. д. с. возбуждения машины на пару полюсов при холостом ходе, которую должны обеспечить постоянные магниты, будет

$$F_п = H_{c1}L_{c1} + 1{,}6B_\delta\delta'\cdot 10^4 + H_{з2}L_{з2} + H_{c2}L_{c2}, \qquad (4\text{-}26)$$

где H_{c1}, $H_{з2}$ и H_{c2} — удельные м. д. с. в станине, зубцах и сердечнике якоря, А/см, определяемые по кривым намагничивания рис. 1.30 или 1.31 и индукциям в этих участках, полученным в позициях 39, 40 и 42 гл. 1; L_{c1}, $L_{з2}$ и L_{c2} — средние длины путей замыкания магнитного поля в соответствующих участках магнитной системы (по позиции 37 гл. 1), см; B_δ — индукция в воздушном зазоре при номинальном поле машины, Т; $\delta' = k_\delta\delta$ — расчетная длина одностороннего воздушного зазора между полюсами и якорем, см.

Участок магнитной системы машины, соответствующий длине постоянных магнитов, не входит в величину $F_п$, так как магниты являются источником м. д. с. $F_м$, которая действует между их полюсами во всей магнитной цепи машины вне магнитов. При этом условии здесь можно написать $F_м = F_п$. Если ввести коэффициент насыщения магнитной системы машины в виде отношения $k_н = \frac{F_п}{1{,}6B_\delta\delta'\cdot 10^4}$, то для необходимой м. д. с. постоянных магнитов на пару полюсов получается

$$F_м = 1{,}6B_\delta k_н k_\delta\delta\cdot 10^4. \qquad (4\text{-}27)$$

В этом случае магнитные проводимости эквивалентного воздушного зазора и полная с учетом насыщения магнитной системы машины в соответствии с уравнениями (4-5) и (4-22) уменьшатся:

$$\Lambda_{\delta э} = \frac{\Lambda_\delta}{k_н}, \text{ Вб/А}, \qquad (4\text{-}28)$$

$$\Lambda_э = \Lambda_{\delta э} + \Lambda_\sigma, \text{ Вб/А}. \qquad (4\text{-}29)$$

Тогда штриховая прямая OA' полной проводимости системы $\Lambda_э$ на рис. 4.7 будет иметь наклон к оси абсцисс под углом

$$\operatorname{tg}\alpha' = \frac{H_c}{B_r}\frac{2h_п}{Q_м}\Lambda_э 10^4. \qquad (4\text{-}30)$$

Ордината $A'C'$ на рис. 4.7 представляет собой индукцию $B_м$ в нейтральном сечении магнитов с учетом размагничивающего действия их концов и насыщения магнитной системы машины. В этом случае величина полезного магнитного поля магнитов в воздушном зазоре машины будет

$$\Phi_б = B_м Q_м \frac{\Lambda_{бэ}}{\Lambda_э}\cdot 10^{-4}, \text{ Вб}. \qquad (4\text{-}31)$$

Это поле пропорционально отрезку $A'B'$.

Коэффициент магнитного рассеяния системы с постоянными магнитами из рис. 4.7 будет

$$\sigma = \frac{\Phi_м}{\Phi_б}. \qquad (4\text{-}32)$$

Критерием правильности выбора соотношений между основными размерами магнитной системы машины здесь опять служит величина магнитной энергии в воздушном зазоре, которая пропорциональна площади прямоугольника $A'B'D'E'$. Эта площадь зависит от положения точки A' на кривой размагничивания (рис. 4.7). Оптимальное положение ее, соответствующее максимуму площади прямоугольника $A'B'D'E'$, определяется графическим путем.

ГЛАВА ПЯТАЯ

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАШИННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ПОПЕРЕЧНЫМ ПОЛЕМ

Электромашинные усилители малой мощности с поперечным полем в диапазоне мощностей от нескольких десятков до нескольких сотен ватт широко используются во многих отраслях техники, применяющих автоматические устройства для регулирования и управления различными исполнительными механизмами, производственными процессами и некоторыми специальными объектами. Назначением электромашинных усилителей (ЭМУ) в этих устройствах является управление относительно большими мощностями с помощью незначительной затраты мощности в управляющей обмотке усилителя.

В конструктивном отношении ЭМУ малой мощности с поперечным полем выполняются в одном корпусе с приводным электродвигателем постоянного или переменного тока. Якорь ЭМУ не отличается от якоря обычной машины постоянного тока; магнитная же

система его выполняется шихтованной в виде пакета из листовой стали с пазами в полюсных наконечниках для размещения компенсационной и подмагничивающей обмоток и обмотки добавочных полюсов (рис. 5.1). Применение шихтованной конструкции магнитной системы ЭМУ вызывается стремлением уменьшить вихревые токи при переходных режимах работы и удобством технологии изготовления полюсов с пазами путем штамповки их вместе со станиной из листовой стали. Как показывает рис. 5.1, оси обмоток управления *3*, компенсационной *2* и добавочных полюсов *1* совпадают с осью главных полюсов. Ось подмагничивающей обмотки *4* совпа-

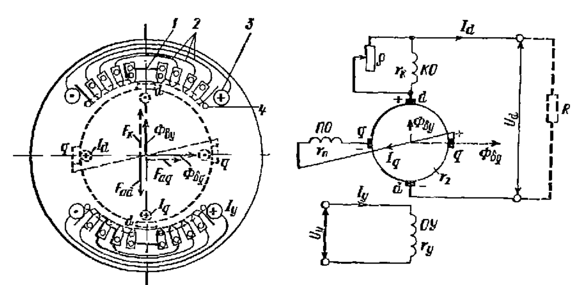


Рис. 5.1. Магнитная система ЭМУ со схемой размещения отдельных обмоток

Рис. 5.2. Схема ЭМУ с подмагничивающей обмоткой

дает с линией положения короткозамкнутых поперечных щеток *q—q* или с поперечной осью магнитной системы машины. Добавочные полюсы *1* в виде зубцов, совпадающих с осью главных полюсов, предназначены для улучшения условий коммутации тока в секциях, замыкающих накоротко продольными щетками *d—d*. В целях уменьшения изменения выходного напряжения U_d ЭМУ при случайных изменениях переходного сопротивления в контактах поперечных щеток и коллектора увеличивают сопротивление цепи поперечных щеток и снижают ток в ней путем последовательного включения в эту цепь специальной подмагничивающей обмотки *ПО* (рис. 5.2). На рис. 5.2 представлена принципиальная схема малого ЭМУ с подмагничивающей обмоткой. Эта обмотка вместе с обмоткой якоря обеспечивает необходимую суммарную м. д. с. F_q от тока I_q для создания требуемого поперечного поля $\Phi_{\delta q}$. В связи с этим ток поперечной цепи получается относительно небольшим и чувствительность выходного напряжения ЭМУ к изменениям переходного сопротивления контактов щеток и коллектора уменьшается.

В целях уменьшения м. д. с. управляющей обмотки воздушный зазор между якорем и полюсами в ЭМУ выполняется по возмож-

ности небольшим, индукции по продольной и поперечной осям выбираются также относительно невысокими, а магнитная система машины делается мало насыщенной. Это обеспечивает получение более высокого коэффициента усиления мощности.

5-1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Основой для расчета электромашинных усилителей с поперечным полем малой мощности (ЭМУ) являются следующие данные:

выходная мощность P_d, Вт;
выходное напряжение U_d, В;
скорость вращения n, об/мин;
коэффициент усиления по мощности — k_y;
ток управления I_y, А;
сопротивление обмотки управления r_y, Ом;
число обмоток управления — задается;
режим работы ЭМУ — продолжительный, кратковременный;
исполнение ЭМУ — закрытое, защищенное.

Коэффициент усиления, параметры и число обмоток управления ЭМУ малой мощности определяются требованиями схемы автоматического устройства, для которой предназначается проектируемый ЭМУ.

5-2. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ЭМУ

Под основными размерами ЭМУ понимаются диаметр и длина якоря, определяемые с помощью известной машинной постоянной. Эта постоянная связывает размеры якоря с расчетной мощностью ЭМУ, скоростью вращения и электромагнитными загрузками.

Основным рабочим магнитным полем электромашинного усилителя с поперечным полем является поперечное поле якоря от тока в замкнутой цепи поперечных щеток. Распределение индукции в воздушном зазоре по окружности якоря ЭМУ от этого поля представлено на рис. 5.3.

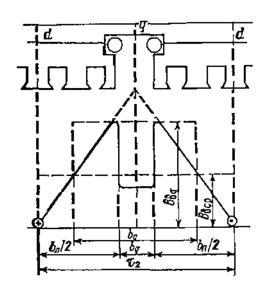


Рис. 5.3. Распределение поперечного поля якоря ЭМУ по его окружности в воздушном зазоре

Геометрический коэффициент полюсного перекрытия

$$\alpha = \frac{b_п}{\tau_2} = \frac{\tau_2 - b_q}{\tau_2} = 1 - \alpha_q = $$

$$= 0{,}74 \div 0{,}82,$$

где в выполненных ЭМУ малой мощности

$$\alpha_q = \frac{b_q}{\tau_2} = 0{,}18 \div 0{,}26.$$

Если построить на рис. 5.3 прямоугольник с высотой $B_{\delta q}$, равновеликий площади, ограниченной действи-

тельной кривой распределения поперечного поля якоря, то расчетный коэффициент полюсного перекрытия ЭМУ

$$\alpha_0 = \frac{b_0}{\tau_2} = 0{,}48 \div 0{,}52.$$

Этот коэффициент определяет величину расчетной полюсной дуги b_0, через которую в дальнейшем вычисляют полезное поперечное поле якоря в воздушном зазоре $\Phi_{\delta q}$.

1. Э. д. с. и ток продольной цепи якоря при нагрузке ЭМУ

$$E_d \approx (1{,}12 \div 1{,}22)\,U_d, \text{ В}; \quad I_d = P_d/U_d, \text{ А},$$

где P_d и U_d берутся по заданию.

2. Расчетная мощность ЭМУ

Расчетная или внутренняя электромагнитная мощность ЭМУ с поперечным полем P_{ad}, равная произведению э. д. с. продольной цепи якоря на ее ток при нагрузке, будет

$$P_{ad} = E_d I_d, \text{ Вт},$$

где E_d и I_d берутся из позиции 1.

3. Машинная постоянная

Машинная постоянная определяет диаметр якоря ЭМУ $D_{н2}$ и расчетную длину пакета l_0 в зависимости от расчетной мощности P_{ad}, скорости вращения n, индукции в воздушном зазоре $B_{\delta q}$ от поперечного поля якоря и линейной нагрузки A_d от продольного тока. Связь между этими величинами выражается следующим образом:

$$C = \frac{6 \cdot 10^4}{\alpha_0 B_{\delta q} A_d} = \frac{D_{н2}^2 l_0 n}{P_{ad}},$$

где $B_{\delta q} = 0{,}35 \div 0{,}45$ — максимальная индукция в воздушном зазоре под краем полюса от поперечного поля якоря (рис. 5.3), Т; $A_d = 30 \div 60$ — линейная нагрузка якоря от продольного тока, А/см; $\alpha_0 = 0{,}48 \div 0{,}52$ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия.

4. Диаметр и расчетная длина пакета якоря

В ЭМУ с поперечным полем малой мощности отношение расчетной длины пакета якоря l_0 к его диаметру или внутреннему диаметру полюсов $D_{п1}$ обычно находится в следующих пределах:

$$\xi = \frac{l_0}{D_{п1}} = 0{,}6 \div 1{,}2.$$

Внутренний диаметр полюсов и расчетная длина пакета якоря из формулы машинной постоянной будут

$$D_{п1}=\sqrt[3]{\frac{C_a P_d}{\xi n}}, \text{ см}; \quad l_0=\xi D_{п1}, \text{ см},$$

где n берется по заданию; P_{ad} — из позиции 2; C — из позиции 3.

Расчетные значения внутреннего диаметра полюсов $D_{п1}$ и длины пакета якоря l_0 обычно округляются до ближайших стандартных чисел согласно ГОСТ 6636—69 (приложение VIII), при этом окончательный диаметр якоря будет

$$D_{н2}=D_{п1}-2\delta, \text{ см},$$

где δ — длина воздушного зазора между полюсами и якорем по позиции 17.

5. Окружная скорость вращения якоря

$$v_2=\frac{\pi D_{н2} n}{60}\cdot 10^{-2}, \text{ м/с},$$

где n берется по заданию; $D_{н2}$ — из позиции 4.

Окружная скорость вращения якоря ЭМУ малой мощности при 5000—8000 об/мин может достигать 20—25 м/с.

6. Полюсный шаг и расчетная полюсная дуга

$$\tau_2=\frac{\pi D_{н2}}{2p}, \text{ см}; \quad b_0=\alpha_0\tau_2, \text{ см},$$

где число полюсов ЭМУ малой мощности $2p=2$; α_0 берется из позиции 3; $D_{н2}$ — из позиции 4.

7. Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2=\frac{pn}{60}, \text{ Гц}.$$

5-3. ОБМОТКА ЯКОРЯ И КОЛЛЕКТОР

Так как ЭМУ малой мощности выполняются двухполюсными, то обмотка якоря их может быть только простой петлевой.

8. Полезное поперечное поле якоря в воздушном зазоре при нагрузке ЭМУ

$$\Phi_{\delta q}=B_{\delta q} b_0 l_0\cdot 10^{-4}, \text{ Вб},$$

где $B_{\delta q}$ берется из позиции 3; l_0 — из позиции 4; b_0 — из позиции 6.

9. Число проводников обмотки якоря

$$N_2=\frac{60 a E_d}{pn\Phi_{\delta q}},$$

где $a=p=1$; n берется по заданию; E_d — из позиции 1; $\Phi_{\delta q}$ — из позиции 8.

10. Число пазов якоря и другие элементы его обмотки

Пазы якоря, коллекторные пластины, витки в секции, проводники в пазу и другие элементы обмотки рассчитываются, так же как и для генераторов постоянного тока малой мощности, по формулам позиций 10—14 гл. 1.

В целях уменьшения ширины коммутационной зоны число пазов якоря в ЭМУ малой мощности обычно выбирается четным и возможно большим.

11. Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

Все изложенное в гл. 1 относительно размеров пазов и проводов обмотки якоря для машин постоянного тока малой мощности целиком может быть отнесено и к рассматриваемым здесь ЭМУ, поэтому расчет их для ЭМУ производится, так же как и для генератора постоянного тока, по формулам позиций 16—24 гл. 1, в которых значения отдельных величин берутся: I_d — из позиции 1; $B_{\delta q}$ — из позиции 3; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4; $2p$ — из позиции 6 гл. 5; остальные величины берутся из соответствующих последующих позиций этой же главы.

12. Коллектор, щеткодержатели и щетки

На коллекторе ЭМУ с поперечным полем устанавливается два комплекта щеток по поперечной и продольной осям машины. Цепь поперечных щеток замыкается или накоротко (рис. 5.1), или на подмагничивающую обмотку (рис. 5.2). Цепь продольных щеток является выходной рабочей цепью ЭМУ.

Конструктивное оформление коллектора и щеточного аппарата ЭМУ малой мощности практически не отличается от рассмотренных выше машин постоянного тока.

Расчет коллектора и размеров щеток этих ЭМУ производится по току продольной цепи по формулам позиций 25—32 гл. 1 как для машин постоянного тока малой мощности, в которых значения отдельных величин берутся: I_d — из позиции 1; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4; v_2 — из позиции 5 гл. 5; остальные величины берутся из соответствующих последующих позиций этой же главы.

Размеры поперечных щеток ЭМУ обычно принимаются равными размерам продольных щеток.

13. Компенсационная обмотка и добавочные полюсы продольной цепи ЭМУ

Компенсационная обмотка, укладываемая в пазах полюсных наконечников статора, предназначается для компенсации м. д. с. якоря от продольного тока I_d (рис. 5.1). Для возможности регулирования степени компенсации м. д. с. якоря компенсационной обмоткой последняя выполняется несколько усиленной и шунтируется регулируемым омическим сопротивлением ρ (рис. 5.2). Обычно

м. д. с. компенсационной обмотки берется на 8—10% больше м. д. с. якоря от продольного тока, т. е.

$$F_{k0}=2W_{к}I_d=(1,08 \div 1,10)\,F_{ad},$$

где м. д. с. якоря $F_{ad}=\frac{N_2}{2p}\frac{I_d}{2a}$; тогда число витков компенсационной обмотки, приходящихся на полюс, будет

$$W_{к}=(1,08 \div 1,10)\frac{N_2}{8},$$

где N_2 берется из позиции 9.

Для улучшения условий коммутации продольного тока в секциях якоря, замыкаемых накоротко продольными щетками, по оси главных полюсов предусматриваются добавочные полюсы в виде зубцов (рис. 5.1). На эти зубцы наматывается часть компенсационной обмотки и обмотка добавочного полюса из того же провода, что и компенсационная. М. д. с. и число витков обмотки добавочного полюса определяются из условия компенсации средней реактивной э. д. с. $e_{р}$ в коммутирующей секции якоря, рассмотренной в позиции 12 гл. 5. М. д. с. и число витков одного добавочного полюса будут:

$$F_{дd}\approx 0,8\lambda_2 A_d k_\delta \delta\cdot 10^6;$$

$$W_{д}=\frac{F_{дd}}{I_d},$$

где I_d берется из позиции 1 и λ_2 — из соответствующих позиций § 5-2, 5-3 или 1-5; δ — величина воздушного зазора под добавочным полюсом, см, k_δ — коэффициент воздушного зазора.

Ширина вершины зубца добавочного полюса в ЭМУ малой мощности обычно принимается приблизительно равной ширине коммутационной зоны, определяемой в соответствующей позиции § 5-3 или 1-5.

После определения размеров зубца добавочного полюса устанавливается число пазов на каждой половине дуги полюсного наконечника (рис. 5.1). При определении этого числа пазов их пазовое деление t_1 выбирается не равным зубцовому шагу якоря $t_2=\frac{\pi D_{н2}}{z_2}$, а принимается в пределах $0,95\,t_2<t_1<1,05\,t_2$.

В этом случае число пазов на одной половине полюса для размещения компенсационной обмотки будет

$$z_{к}\approx\frac{b_{п}-2t_1}{2t_1},$$

где $b_{п}$ — геометрическая полюсная дуга, см.

Число проводников компенсационной обмотки в пазу статора

$$N_{п}=\frac{W_{к}}{z_{к}}.$$

Сечение провода компенсационной обмотки и добавочного полюса предварительно

$$q'_{к} = \frac{I_d}{j'_{к}}, \text{ мм}^2,$$

где I_d берется из позиции 1; $j'_{к} = 2{,}5 \div 5{,}0$ — плотность тока в компенсационной обмотке, А/мм².

Сечение и диаметр провода окончательно выбираются по данным ГОСТ (приложение I)

$$q_{к} = \ldots; \quad d_{к}/d_{к.и} = \ldots$$

После этого определяются требуемые площади больших и малых пазов статора (рис. 5.1) тем же способом, как и для якоря в § 5-3.

Зубцы статора делаются с одинаковой толщиной по высоте, а пазы — трапецеидальной формы.

При выборе размеров двух больших пазов статора следует по обе стороны добавочного полюса (рис. 5.1) предусмотреть место не только для укладки части компенсационной обмотки и обмотки добавочного полюса, но также и место для размещения подмагничивающей обмотки *4* в поперечной цепи.

Сопротивление компенсационной обмотки и добавочных полюсов определяется по известной формуле

$$r_{к} + r_{д} = k_{\Theta} \frac{2(W_{к} + W_{д})\, l_{ср1}}{5700 q_{к}}, \text{ Ом},$$

где $l_{ср1} = 2(l_0 + 1{,}4 \cdot \tau_2)$ — средняя длина витка компенсационной обмотки, см; $k_{\Theta} = 1 + 0{,}004(\vartheta - 20)$ — коэффициент увеличения сопротивления от температуры; ϑ — температура нагрева обмотки, °С.

5-4. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЭМУ

Как указывалось, магнитная система ЭМУ с поперечным полем выполняется шихтованной в связи с удобством технологии изготовления полюсов с пазами путем штамповки их вместе со станиной из листовой стали (рис. 5.1).

Магнитная система ЭМУ в целом делается мало насыщенной, в связи с чем индукция в ее отдельных участках обычно не превосходит 1,0 — 1,2 Т, кроме зубцов якоря.

Расчет магнитной системы второй ступени усиления

14. Э. д. с. продольной цепи якоря при нагрузке

Окончательно

$$E_d = U_d + I_d(r_2 + r_{к} + r_{д}) + \Delta U_{щd}, \text{ В},$$

где U_d берется по заданию, I_d — из позиции 1; $\Delta U_{щd}$, r_2, $r_{к}$ и $r_{д}$ — из соответствующих позиций § 5-3 или 1-5.

15. Полезное поперечное поле якоря в воздушном зазоре при нагрузке, создаваемое током цепи поперечных щеток I_q

$$\Phi_{\delta q}=\frac{60aE_d}{pnN_2}, \text{ Вб},$$

где $a = p = 1$; n берется по заданию; N_2 — из позиции 9.

Распределение этого поля в воздушном зазоре по окружности якоря представлено на рис. 5.3.

16. Окончательное значение индукции поперечного поля якоря под краем полюсного наконечника (рис. 5-3)

$$B_{\delta q}=\frac{\Phi_{\delta q}\cdot 10^4}{b_0 l_0}, \text{ Т},$$

где l_0 берется из позиции 4; b_0 — из позиции 6; $\Phi_{\delta q}$ — из позиции 15.

17. Длина воздушного зазора в ЭМУ малой мощности

Может быть выбрана по следующей полуэмпирической формуле:

$$\delta\approx 0{,}4\frac{\tau_2 A_d}{B_{\delta q}}\cdot 10^{-4}, \text{ см},$$

где τ_2 берется из позиции 6; $B_{\delta q}$ — из позиции 16; A_d — из соответствующей позиции § 5-2.

18. Высота сердечника якоря

$$h_{c2}=\frac{D_{н2}-(2h_{п2}+d_{вл})}{2}, \text{ см},$$

где диаметр вала по опыту построенных машин можно принять $d_{вл}\approx(0{,}20\div 0{,}24)\,D_{н2}$, при этом $D_{н2}$ берется из позиции 4; $h_{п2}$ — из соответствующей позиции § 5-3.

19. Размеры статора ЭМУ

Наружный диаметр статора (рис. 5.1)

$$D_{н1}=D_{н2}+2\delta+2h'_{п1}+2h_{c1}, \text{ см},$$

где высота сердечника статора по оси полюса

$$h_{c1}=\frac{\Phi_{\delta q}\cdot 10^4}{2\cdot 0{,}93B_{c1}l_0}, \text{ см},$$

при этом $B_{c1} = 0{,}8\div 1{,}0$ Т; $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4; δ — из позиции 17; $h'_{п1}$ — из соответствующей позиции § 5-3.

Расчетное значение диаметра $D_{н1}$ округляется до ближайшего стандартного числа согласно ГОСТ 6636—69 (приложение VIII).

20. М. д. с. для воздушного зазора

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_2 + 10\delta}{t_2 - a_{п2} + 10\delta} \cdot \frac{t_1 + 10\delta}{t_1 - a_{п1} + 10\delta}.$$

М. д. с. для воздушного зазора

$$F_{\delta q} = 1{,}6 B_{\delta q} k_\delta \delta \frac{\alpha_0}{\alpha} \cdot 10^4,$$

где α_0 берется из позиции 2; $B_{\delta q}$ — из позиции 16; δ — из позиции 17; $\alpha = 0{,}74 \div 0{,}82$.

21. М. д. с. для зубцов якоря

Индукция в сечении зубца с одинаковой толщиной по высоте

$$B_{з2} = \frac{B_{\delta q} t_2}{0{,}93 \cdot b_{з2}}, \text{ Т}.$$

М. д. с. для зубцов

$$F_{з2} = H_{з2} \cdot 2h_{п2},$$

где $B_{\delta q}$ берется из позиции 16; t_2, $h_{п2}$ и $b_{з2}$ — из соответствующих позиций § 5-3; $H_{з2}$ — из кривой намагничивания рис. 1.30.

22. М. д. с. для сердечника якоря

Индукция в сердечнике якоря

$$B_{c2} = \frac{\Phi_{\delta q} \cdot 10^4}{2 \cdot 0{,}93 l_0 h_{c2}}, \text{ Т}.$$

Средняя длина пути замыкания магнитного поля

$$L_{c2} \approx \frac{\pi (D_{н2} - 2h_{п2} - h_{c2})}{4p}, \text{ см}.$$

М. д. с. для сердечника

$$F_{c2} = H_{c2} L_{c2},$$

где $p = 1$; $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4; $\Phi_{\delta q}$ — из позиции 15; h_{c2} — из позиции 18; $h_{п2}$ — из соответствующей позиции § 5-3; H_{c2} — из кривой намагничивания рис. 1.30.

23. М. д. с. для зубцов статора

Индукция в сечении зубца с одинаковой толщиной по высоте

$$B_{з1} = \frac{B_{\delta q} t_1}{0{,}93 b_{з1}}, \text{ Т}.$$

М. д. с. зубцов

$$F_{з1} = H_{з1} 2h_{п1},$$

где $B_{\delta q}$ берется из позиции 16; $h_{п1}$, t_1 и $b_{з1}$ — из соответствующих позиций § 5-3; $H_{з1}$ — из кривой намагничивания рис. 1.30.

24. М. д. с. для сердечника статора

Индукция в сердечнике статора

$$B_{c1} = \frac{\Phi_{\delta q} \cdot 10^4}{2 \cdot 0{,}93 h_{c1} l_0}, \text{ Т.}$$

Средняя длина пути замыкания магнитного поля

$$L_{c1} \approx \frac{\pi (D_{н1} - h_{c1})}{4p}, \text{ см.}$$

М. д. с. для сердечника

$$F_{c1} = H_{c1} L_{c1},$$

где $p = 1$; l_0 берется из позиции 4; $\Phi_{\delta q}$ — из позиции 15; $D_{н1}$ и h_{c1} — из позиции 19; H_{c1} — из кривой намагничивания рис. 1.30.

25. Полная м. д. с. возбуждения по поперечной оси машины, создаваемая током I_q

$$F_q = F_{\delta q} + F_{з2} + F_{c2} + F_{з1} + F_{c1},$$

где $F_{\delta q}$ берется из позиции 20; $F_{з2}$ — из позиции 21; F_{c2} — из позиции 22; $F_{з1}$ — из позиции 23; F_{c1} — из позиции 24.

Эта м. д. с. в общем случае в малых ЭМУ должна создаваться как обмоткой якоря, так и подмагничивающей обмоткой *ПО* (рис. 5.2):

$$F_q = \alpha F_{aq} + \frac{\alpha}{2\alpha_0} F_{п},$$

где $\alpha = 0{,}74 \div 0{,}82$; $\alpha_0 = 0{,}48 \div 0{,}52$; $F_{aq} = \frac{N_2}{2p} \frac{I_q}{2a}$ — м. д. с. якоря от поперечного тока; $F_{п} = 2W_{п} I_q$ — м. д. с. подмагничивающей обмотки.

В ЭМУ малой мощности м. д. с. подмагничивающей обмотки обычно составляет 40—60% общей м. д. с. поперечной цепи:

$$F_{п} = (0{,}4 \div 0{,}6) F_q$$

и соответственно

$$F_{aq} = \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{(0{,}4 \div 0{,}6)}{2\alpha_0}\right] F_q.$$

26. Ток в цепи поперечных щеток

$$I_q = \left[\frac{1}{\alpha} - \frac{(0{,}4 \div 0{,}6)}{2\alpha_0}\right] \frac{4apF_q}{N_2}, \text{ А,}$$

где $a = p = 1$; N_2 берется из позиции 9; F_q — из позиции 25.

27. Число витков подмагничивающей обмотки на полюс

$$W_п = (0{,}4 \div 0{,}6)\frac{F_q}{2I_q},$$

где F_q берется из позиции 25; I_q — из позиции 26.

28. Сечение и диаметр провода подмагничивающей обмотки

$$q'_п = \frac{I_q}{j_п}, \text{ мм}^2,$$

где I_q берется из позиции 26; $j_п = 3 \div 5$ А/мм² — плотность тока в проводах подмагиичивающей обмотки.

Сечение и диаметр провода окончательно выбираются по данным ГОСТ (приложение I)

$$q_п = \ldots; \quad d_п/d_{п.\,и} = \ldots$$

Эта обмотка укладывается в пазы статора вместе с обмоткой добавочных полюсов и компенсационной.

29. Сопротивление подмагничивающей обмотки

$$r_п = k_\Theta \frac{2pW_п l_{ср.\,п}}{5700 q_п}, \text{ Ом},$$

где $2p = 2$; $W_п$ берется из позиции 27; $q_п$ — из позиции 28; k_Θ — из соответствующей позиции § 5-3; $l_{ср.\,п}$ — средняя длина витка подмагничиввющей обмотки по эскизу ее расположения (рис. 5.1.).

Расчет магнитной системы первой ступени усиления

30. Э. д. с. якоря в цепи поперечных щеток

$$E_q = I_q(r_2 + r_п) + \Delta U_{щq}, \text{ В},$$

где I_q берется из позиции 26; $r_п$ — из позиции 29; r_2 и $\Delta U_{щq}$ — из соответствующих позиций § 5-3.

31. Полезное магнитное поле в воздушном зазоре первой ступени усиления (поле управления)

$$\Phi_{\delta у} = \frac{60aE_q}{pnN_2}, \text{ Вб},$$

где $a = p = 1$; n берется из задания; N_2 — из позиции 9; E_q — из позиции 30.

Обмотка управления, создающая это магнитное поле по продольной оси полюсов ЭМУ, в принципе представляет собой обмотку возбуждения обычной машины постоянного тока, и она рассчитывается так же, как в этой машине. Однако из-за отсутствия насыщения магнитной системы ЭМУ от поля $\Phi_{\delta у}$ м. д. с. обмотки управления $F_у$ в малых ЭМУ практически численно складывается

из двух основных: м. д. с. для воздушного зазора $F_{\delta у}$ и м. д. с. коммутационной реакции якоря $F_{кq}$ от добавочных токов в секциях, замыкаемых накоротко поперечными щетками при замедленной коммутации тока в них. Определенное влияние на м. д. с. обмотки управления могут оказывать магнитные потери на вихревые токи в стали якоря. Однако количественный учет этого явления в ЭМУ не получил еще разработки и поэтому в данном расчете не рассматривается. Таким образом, с достаточной точностью можно написать:

$$F_у \approx F_{\delta у} + F_{кq}.$$

32. Индукция в воздушном зазоре под полюсами от поля управления

$$B_{\delta у} = \frac{\Phi_{\delta у} \cdot 10^4}{\alpha \tau_2 l_0}, \text{ Т},$$

где l_0 берется из позиции 4; τ_2 — из позиции 6; α — из позиции 25.

33. М. д. с. для воздушного зазора

$$F_{\delta у} = 1{,}6 B_{\delta у} k_\delta \delta \cdot 10^4,$$

где δ берется из позиции 17; k_δ — из позиции 20; $B_{\delta у}$ — из позиции 32.

34. М. д. с. коммутационной реакции якоря

При замедленной коммутации тока эту м. д. с. можно приближенно определить по предлагаемой автором формуле, приведенной позиции 45 гл. I.

$$F_{кq} = b_к A_q \frac{1}{1{,}7A + 1}\left(1 + \frac{0{,}2\pi\tau_2}{\delta_0 \lambda_2} \cdot 10^{-8}\right),$$

где $A_q = A_d \dfrac{I_q}{I_d}$ — линейная нагрузка якоря от поперечного тока;

$$A = \frac{R_{щq} T_к}{L_\sigma}; \quad R_{щq} = \frac{\Delta U_{щq}}{2 I_щ}; \quad T_к = \frac{b_щ}{v_к};$$

$L_\sigma = \dfrac{w'_{с2} \lambda_2 A_q l_0 b'_щ}{i_{aq}}$ — средняя эквивалентная индуктивность секции якоря, Г; $\Delta U_{щq}$ — переходное падение напряжения в контактах двух разноименных поперечных щеток, В; $I_щ = I_q/p$ — ток одной поперечной щетки, А; $i_{aq} = I_q/2a$, А, при этом $p = 1$; $2a = 2$; I_d берется из позиции 1; l_0 — из позиции 4; τ_2 — из позиции 6; I_q — из позиции 26; A_d, $w'_{с2}$, $b'_щ$, $b_щ$, $\Delta U_{щq}$, $b_к$, $v_к$, λ_2 и δ_0 — из соответствующих позиций § 5-3.

35. Полная м. д. с. обмотки управления на пару полюсов

$$F_у = F_{\delta у} + F_{кq},$$

где $F_{\delta у}$ берется из позиции 33; $F_{кq}$ — из позиции 34.

36. Число витков обмотки управления, приходящееся на один полюс

$$W_у = \frac{F_у}{2I_у},$$

где $I_у$ берется по заданию; $F_у$ — из позиции 35.

37. Сечение и диаметр провода обмотки управления

Так как ток управления в ЭМУ малой мощности с поперечным полем обычно незначителен, то сечение и диаметр провода обмотки управления выбираются не по условиям допустимой плотности тока, а по технологическим соображениям и заданному сопротивлению. Диаметр провода в этом случае обычно берется не менее 0,08 — 0,10 мм.

38. Сопротивление обмотки управления

$$r_у = \frac{2pW_у l_{ср.\,у}}{5700q_у}, \text{ Ом},$$

где $2p = 2$; $W_у$ берется из позиции 36; $l_{ср.\,у}$ — средняя длина витка обмотки управления, определяется по эскизу расположения обмотки управления на полюсе, см; при этом таких обмоток может быть две или более.

Если задано омическое сопротивление обмотки управления, то в этой позиции уточняется поперечное сечение ее провода $q_у$.

39. Проверка коэффициента усиления ЭМУ по мощности

$$k_у = \frac{P_d}{I_у^2 r_у},$$

где P_d и $I_у$ берутся по заданию; $r_у$ — из позиции 38.

40. Постоянные времени обмотки управления и цепи поперечных щеток

Постоянная времени обмотки управления

$$T_у = \frac{2pW_у\sigma_у\Phi_{\delta у}}{I_у r_у}, \text{ с}.$$

Постоянная времени цепи поперечных щеток

$$T_q = \frac{\alpha(\alpha_0 N_2 + 4apW_п)\sigma_q\Phi_{\delta q}}{\alpha_0 4aI_q(r_2 + r_п + r_щ)}, \text{ с},$$

где $\sigma_у = 1,10 \div 1,15$; $\sigma_q = 1,15 \div 1,20$; $r_щ = \frac{\Delta U_{щq}}{2I_q}$; $2p = 2$; $a = 1$; $\alpha = 0,74 \div 0,82$; $\alpha_0 = 0,48 \div 0,52$; $I_у$ и $r_у$ берутся по заданию; N_2 — из позиции 9; r_2 — из позиции 11; $\Delta U_{щq}$ — из позиции 12; $\Phi_{\delta q}$ — из позиции 15; I_q — из позиции 26; $W_п$ — из позиции 27; $r_п$ — из позиции 29; $\Phi_{\delta у}$ — из позиции 31.

5-5. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭМУ

Потери и к. п. д. ЭМУ с поперечным полем рассчитываются так же, как и в генераторах постоянного тока малой мощности, по формулам позиций 60—66 гл. 1.

Особенностью здесь является учет электрических потерь в обмотке якоря по формуле

$$P_{м2} = \left(I_d^2 + I_q^2\right) r_2, \text{ Вт.}$$

Переходные и механические потери должны вычисляться для двух комплектов щеток, а магнитные потери в стали якоря определяются только от основного поперечного поля якоря.

Пример расчета ЭМУ с поперечным полем

Задание

Выходная мощность $P_d = 120$ Вт;
выходное напряжение $U_d = 60$ В;
скорость вращения $n = 6000$ об/мин;
коэффициент усиления по мощности $k_y = 2000$;
ток управления $I_y = 0{,}02$ А;
сопротивление обмотки управления $r_y = 150$ Ом;
число обмоток управления 2;
режим работы ЭМУ продолжительный;
исполнение ЭМУ закрытое.

Основные размеры ЭМУ

1. Э. д. с. и ток продольной цепи якоря

$$E_d = (1{,}12 \div 1{,}22)\, U_d = 1{,}16 \cdot 60 = 70 \text{ В}; \quad I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{120}{60} = 2 \text{ А}.$$

2. Расчетная мощность ЭМУ

$$P_{ad} = E_d \cdot I_d = 70 \cdot 2 = 140 \text{ Вт}.$$

3. Машинная постоянная

$$C = \frac{6 \cdot 10^4}{\alpha_0 B_{\delta q} A_d} = \frac{6 \cdot 10^4}{0{,}52 \cdot 0{,}36 \cdot 48} = 6660,$$

где принято $\alpha_0 = 0{,}52$; $B_{\delta q} = 0{,}36$ Т; $A_d = 48$ А/см.

4. Внутренний диаметр полюсов и расчетная длина якоря:

$$D_{п1} = \sqrt[3]{\frac{CP_{ad}}{\xi n}} = \sqrt[3]{\frac{6660 \cdot 140}{1{,}2 \cdot 6000}} \approx 5{,}0 \text{ см};$$

$$l_0 = \xi D_{п1} = 1{,}2 \cdot 5{,}0 = 6{,}0 \text{ см},$$

где предварительно принято $\xi = 1{,}2$.

Окончательно по ГОСТ 6636—69 (приложение VIII) принимаем: $D_{п1} = 50$ мм; $l_0 = 60$ мм; $\delta = 0{,}40$ мм; диаметр якоря $D_{н2} = D_{п1} - 2\delta = 50 - 2 \cdot 0{,}40 = 49{,}2$ мм.

Материал якоря — листовая электротехническая сталь марки Э31 толщиной 0,35 мм (ГОСТ 802—58, приложение IV).

5. Окружная скорость вращения якоря

$$v_2 = \frac{\pi D_{н2} n}{60} \cdot 10^{-2} = \frac{\pi \cdot 4{,}92 \cdot 6000}{60} \cdot 10^{-2} = 15{,}4 \text{ м/с}.$$

6. Полюсный шаг и расчетная полюсная дуга

$$\tau_2 = \frac{\pi D_{н2}}{2p} = \frac{\pi \cdot 4{,}92}{2} = 7{,}72 \text{ см};$$

$$b_0 = \alpha_0 \tau_2 = 0{,}52 \cdot 7{,}72 = 4{,}0 \text{ см}.$$

7. Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 6000}{60} = 100 \text{ Гц}.$$

Обмотка якоря

8. Полезное поперечное поле якоря в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta q} = B_{\delta q} b_0 l_0 \cdot 10^{-4} = 0{,}36 \cdot 4{,}0 \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-4} \approx 0{,}87 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

9. Число проводников обмотки якоря

$$N_2 = \frac{60 a E_d}{pn \Phi_{\delta q}} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 70}{1 \cdot 6000 \cdot 0{,}87 \cdot 10^{-3}} \approx 800.$$

10. Число пазов якоря

$$z_2 = (3 \div 4)\, D_{н2} = (3 \div 4) \cdot 4{,}92 \approx 15 \div 19;$$

принимаем $z_2 = 18$.

11. Число коллекторных пластин

$$K = 2z_2 = 2 \cdot 18 = 36.$$

12. Число витков в секции обмотки якоря

$$w'_{c2} = \frac{N_2}{2K} = \frac{792}{2 \cdot 36} = 11,$$

где окончательно принято $N_2 = 792$, тогда значения индукции и полезного поля в воздушном зазоре будут:

$$B_{\delta q} = 0{,}36 \cdot \frac{800}{792} = 0{,}365 \text{ Т};$$

$$\Phi_{\delta q} = 0{,}87 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{800}{792} = 0{,}88 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

13. Число проводников в пазу якоря

$$N_{2п} = \frac{N_2}{z_2} = \frac{792}{18} = 44.$$

14. Шаги обмотки якоря по секциям и коллектору

$$y_1 = \frac{K}{2p} - \varepsilon = \frac{36}{2} - 0 = 18;$$

$$y_2 = y_1 - 1 = 18 - 1 = 17; \quad y = 1; \quad y_к = 1.$$

После этого вычерчивается в развернутом виде схема обмотки якоря.

15. Окончательная величина линейной нагрузки якоря от продольного тока

$$A_d = \frac{N_2 I_d}{2\pi D_{н2}} = \frac{792 \cdot 2}{2\pi \cdot 4,92} \approx 51 \text{ А/см}.$$

Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

16. Предварительный выбор плотности тока в обмотке якоря.

Удельная тепловая загрузка боковой поверхности якоря при продолжительном режиме работы ЭМУ в наземных условиях при нормальном давлении воздуха

$$q = \Delta\vartheta_m \alpha' (1 + 0,1 \cdot v_2) = 65 \cdot 0,0016 (1 + 0,1 \cdot 15,4) \approx 0,26 \text{ вт/см}^2,$$

где $\Delta\vartheta_m = 65°$ С; $\alpha' = 0,0016$ Вт/(см²·град).

Допустимая плотность тока в обмотке якоря в среднем

$$j_2' = \frac{1400 \cdot q}{A_d} = \frac{1400 \cdot 0,26}{51} = 7,1 \text{ А/мм}^2.$$

17. Сечение и диаметр провода обмотки якоря

$$q_2' = \frac{I_d}{2j_2'} = \frac{2}{2 \cdot 7,1} = 0,141 \text{ мм}^2.$$

По ГОСТ 7262—54 (приложение I) окончательно принимаем:

$$q_2 = 0,132 \text{ мм}^2; \quad d_2/d_{2н} = 0,41/0,47 \text{ мм};$$

марка провода ПЭВ-2.

18. Окончательная плотность тока в обмотке якоря

$$j_2 = \frac{I_d}{2q_2} = \frac{2}{2 \cdot 0,132} \approx 7,6 \text{ А/мм}^2.$$

19. Площадь сечения паза якоря:

Площадь паза, занимаемая изолированными проводниками,

$$Q_{п.п} = \frac{N_{2п} d_{2н}^2}{f_0} = \frac{44 \cdot 0,47^2}{0,72} = 13,5 \text{ мм}^2,$$

площадь паза, занимаемая пазовой изоляцией,

$$Q_{п.и} = \delta_и П = 0,3 \cdot 29 \approx 9 \text{ мм}^2;$$

где периметр паза $П = 0,6 \cdot D_{н2} = 0,6 \cdot 49,2 \approx 29$ мм.

Толщина пазовой изоляции $\delta_и = 0,30$ мм состоит из лакоткани ЛШС — 0,10 мм (ГОСТ 2214—60, приложение II) и электрокартона ЭВ — 0,20 мм (ГОСТ 2824—60, приложение III);

площадь паза, занимаемая клином,

$$Q_{п.к} = b_{кл} \cdot h_{кл} = 3 \cdot 0,8 \approx 2,5 \text{ мм}^2,$$

где принято $b_{кл} = 3$ мм; $h_{кл} = 0,8$ мм;

общая требуемая площадь паза якоря

$$Q_п = Q_{п.п} + Q_{п.и} + Q_{п.к} = 13,5 + 9 + 2,5 = 25 \text{ мм}^2.$$

20. Коэффициент заполнения паза изолированным проводом

$$k_{п. и} = \frac{N_{2п}q_{2и}}{Q_п} = \frac{44 \cdot 0,173}{25} = 0,30,$$

что вполне допустимо.

21. Размеры паза и зубца якоря.

Принимаем трапецеидальные пазы с одинаковой толщиной зубца по его высоте (рис. 1.3, *б*). Минимальная толщина зубца

$$b''_{з2} = \frac{B_{\delta q} t_2}{0,93\, B_{з2}} = \frac{0,365 \cdot 0,86}{0,93 \cdot 1,3} = 0,26 \text{ см},$$

где зубцовый шаг якоря

$$t_2 = \frac{\pi D_{н2}}{z_2} = \frac{\pi \cdot 4,92}{18} = 0,86 \text{ см}.$$

После вычерчивания паза в масштабе, согласно рис. 1.9, размеры его

$$h_{п2} = 12 \text{ мм}; \quad b'_{п2} = 5,4 \text{ мм}; \quad b''_{п2} = 2,2 \text{ мм}.$$

Ширина прорези паза

$$a_{п2} = 3,0\, d_{2и} = 3,0 \cdot 0,47 = 1,4 \text{ мм};$$

размеры зубца (рис. 1.3, *б*)

$$b'_{з2} = t_2 - a_{п2} = 0,86 - 0,14 = 0,72 \text{ см}; \quad b''_{з2} = 0,26 \text{ см}.$$

22. Средняя длина одного проводника обмотки якоря

$$l_{ср2} = l_0 + 1,2\, D_{н2} = 6,0 + 1,2 \cdot 4,92 \approx 12,0 \text{ см}.$$

23. Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии при $\vartheta = 75°$ С

$$r_2 = 1,22 \frac{N_2 l_{ср2}}{5700 \cdot 4q_2} = 1,22 \frac{792 \cdot 12,0}{5700 \cdot 4 \cdot 0,132} \approx 3,8 \text{ Ом}.$$

24. Падение напряжения в обмотке якоря

$$\Delta U_2 = I_d r_2 = 2 \cdot 3,8 = 7,6 \text{ В},$$

что составляет

$$\frac{7,6}{60} \cdot 100 \approx 13\%.$$

Коллектор и щетки

25. Предварительная величина диаметра коллектора

$$D'_к = (0,5 \div 0,9)\, D_{н2} = 0,7 \cdot 49,2 \approx 34 \text{ мм}.$$

26. Ширина коллекторной пластины

$$t'_к = \frac{\pi D'_к}{K} = \frac{\pi \cdot 34}{36} \approx 3,0 \text{ мм},$$

примем $\beta_к = 2,6$ мм; $\beta_и = 0,6$ мм; тогда окончательное коллекторное деление

$$t_к = \beta_к + \beta_и = 2,6 + 0,6 = 3,2 \text{ мм}.$$

27. Окончательный диаметр коллектора и его окружная скорость вращения

$$D_к = \frac{K t_к}{\pi} = \frac{36 \cdot 0{,}32}{\pi} \approx 3{,}7 \text{ см};$$

$$v_к = \frac{\pi D_к n}{60} \cdot 10^{-2} = \frac{\pi \cdot 3{,}7 \cdot 6000}{60} 10^{-2} = 11{,}6 \text{ м/с}.$$

28. Сорт щеток и плотность тока под щетками.

Принимаем щетки марки ЭГ-8; тогда согласно табл. 1.1 данные этих щеток:

$$j_{щd} = 10 \text{ А/см}^2; \quad \Delta U_{щ\,d} = 2{,}4 \text{ В}; \quad \mu = 0{,}25;$$

$$p_{щd} = 2{,}45 \text{ Н/см}^2 \ (0{,}25 \text{ кг/см}^2).$$

29. Площадь сечения щетки и ее размеры

$$S'_{щd} = \frac{I_d}{p j_{щd}} = \frac{2}{1 \cdot 10} = 0{,}20 \text{ см}^2;$$

примем по ГОСТ 12232—71 (табл. 1.2):

$$b_щ = (1 \div 3) \beta_к = 1{,}54 \cdot 2{,}6 \approx 4 \text{ мм}; \quad a_щ = 5 \text{ мм}; \quad h_щ = 8 \text{ мм};$$

тогда окончательно

$$S_{щd} = 0{,}4 \cdot 0{,}5 = 0{,}20 \text{ см}^2.$$

Такие же размеры имеют и поперечные щетки ЭМУ.

30. Длина коллектора

$$l'_к = (1{,}5 \div 2{,}0)\, a_щ = 2 \cdot 5 = 10 \text{ мм};$$

$$l_к = l'_к + (3 \div 5)\, d_2 = 10 + 5 \cdot 0{,}41 \approx 12 \text{ мм}.$$

31. Проверка коммутации.

Ширина коммутационной зоны

$$b_к = b'_щ + \left[u_к + \left|\frac{K}{2p} - y_1\right| - \frac{a}{p}\right] t'_к =$$

$$= 0{,}532 + \left[2 + \left|\frac{36}{2} - 18\right| - \frac{1}{1}\right] \cdot 0{,}425 = 0{,}957 \text{ см};$$

что вполне допустимо, так как

$$b_к < 0{,}8 (\tau_2 - b_0) = 0{,}8 (7{,}72 - 4{,}0) = 3{,}0 \text{ см};$$

при этом

$$b'_щ = b_щ \frac{D_{н2}}{D_к} = 0{,}4 \frac{4{,}92}{3{,}7} = 0{,}532 \text{ см};$$

$$t'_к = t_к \frac{D_{н2}}{D_к} = 0{,}32 \frac{4{,}92}{3{,}7} = 0{,}425 \text{ см}.$$

Удельная магнитная проводимость для полей рассеяния обмотки якоря

$$\lambda_2 = \left[0,6\frac{2h_{п2}}{b'_{п2}+b''_{п2}} + \frac{l_л}{l_0} + 0,92\log\left(\frac{\pi\cdot t_2}{a_{п2}}\right)\right]\cdot 10^{-8} =$$

$$= \left[0,6\frac{2\cdot 1,2}{0,54+0.22} + \frac{1,2\cdot 4,92}{6,0} + 0,92\log\left(\frac{\pi\cdot 0,86}{0,14}\right)\right]\cdot 10^{-8} =$$

$$= 4,05\cdot 10^{-8}\ \text{Вб/(А}\cdot\text{см)}.$$

Среднее значение реактивной э. д. с. в короткозамкнутой секции якоря

$$e_р = 2w'_{c2}\lambda A_d l_0 v_2\cdot 10^2 = 2\cdot 11\cdot 4,05\cdot 10^{-8}\cdot 51\cdot 6,0\cdot 15,4\cdot 10^2 = 0,42\ \text{В}.$$

Э. д. с. в этой секции от поля якоря

$$e_в = \frac{0,4\pi w'_{c2}A_d\tau_2 l_0 v_2\cdot 10^{-6}}{\delta_0} = \frac{0,4\pi\cdot 11\cdot 51\cdot 7,72\cdot 6,0\cdot 15,4\cdot 10^{-6}}{1,8} \approx 0,28\ \text{В},$$

где

$$\delta_0 \approx \frac{\tau_2 - b_0}{2} = \frac{7,72-4,0}{2} \approx 1,8\ \text{см}.$$

Результирующая э. д. с. в короткозамкнутой секции якоря

$$e = e_р + e_в = 0,42 + 0,28 = 0,70\ \text{В},$$

что допустимо, так как $e < 1,5$ В.

Компенсационная обмотка и добавочные полюсы продольной цепи ЭМУ

32. Число витков компенсационной обмотки, приходящееся на полюс,

$$W_к = (1,08 \div 1,10)\frac{N_2}{3} = 1,09\frac{792}{8} = 108.$$

33. Число витков обмотки добавочных полюсов, приходящееся на полюс,

$$W_д = \frac{0,8\lambda_2 A_d k_\delta \delta\cdot 10^2}{I_d} = \frac{0,8\cdot 4,05\cdot 10^{-8}\cdot 51\cdot 1,3\cdot 0,04\cdot 10^8}{2} \approx 4,$$

где принято $k_\delta \approx 1,30$.

Ширину вершины зубца добавочного полюса в малых ЭМУ принимают

$$b_{з1} \approx b_к \approx 1,0\ \text{см}.$$

34. Число пазов на половине дуги полюсного наконечника (рис. 5.1). Примем пазовое деление на статоре

$$t_1 = 0,95\cdot t_2 = 0,95\cdot 0,86 = 0,82\ \text{см}.$$

Число пазов на одной половине полюса для размещения компенсационной обмотки

$$z_к \approx \frac{b_п - 2t_1}{2t_1} = \frac{6,3-2\cdot 0,82}{2\cdot 0,82} \approx 3,$$

где $b_п = \alpha\tau_2 = 0,82\cdot 7,72 = 6,3$.

35. Число проводников компенсационной обмотки в пазу статора

$$N_{к}=\frac{W_{к}}{z_{к}}=\frac{108}{3}=36.$$

36. Сечение и диаметр провода компенсационной обмотки и добавочного полюса

$$q_{к}'=\frac{I_{d}}{j_{к}'}=\frac{2}{3}=0{,}67 \text{ мм}^2$$

По ГОСТ 7262—54 (приложение I) окончательно принимаем: $q_{к}=0{,}636$ мм^2; $d_{к}/d_{к,и}=0{,}90/0{,}99$ мм; марка провода ПЭВ-2.

37. Площадь и размеры пазов статора.

Согласно позиции 34 на каждой половине полюсного наконечника статора располагается по 3 паза; из них один больщой и два малых. В большой паз укладываются проводники обмоток добавочного полюса, компенсационной и подмагничивающей. Подмагничивающая обмотка обычно занимает около 30—40% площади большого паза.

Площадь большого паза, занимаемая проводниками обмоток добавочного полюса и компенсационной:

площадь паза, занимаемая изолированными проводниками этих обмоток,

$$Q_{п.п1}'=\frac{(N_{к}+W_{д})\,d_{к.и}^2}{f_0}=\frac{(36+4)\cdot 0{,}99^2}{0{,}72}\approx 54 \text{ мм}^2;$$

площадь паза, занимаемая пазовой изоляцией,

$$Q_{и.п1}'=\delta_{и}\Pi'=0{,}3\cdot 36\approx 11 \text{ мм}^2,$$

где периметр паза принят $\Pi'\approx 36$ мм.

Общую площадь большого паза статора примем

$$Q_{п1}'=1{,}3\left(Q_{п.п1}'+Q_{и.п1}'\right)=1{,}3\,(54+11)\approx 85 \text{ мм}^2.$$

Площадь малого паза, занимаемая изолированными проводниками компенсационной обмотки и пазовой изоляцией,

$$Q_{п.п1}''=\frac{W_{к}d_{к.и}^2}{f_0}=\frac{36\cdot 0{,}99^2}{0{,}72}=49 \text{ мм}^2;$$

$$Q_{и.п1}''=\delta_{и}\Pi''=0{,}3\cdot 30=9 \text{ мм}^2,$$

где принято $\Pi''\approx 30$ мм.

Общая площадь малого паза статора

$$Q_{п1}''=Q_{п.п1}''+Q_{и.п1}''=49+9=58 \text{ мм}^2.$$

Форму сечения большого и малых пазов статора примем трапецеидальной с одинаковой толщиной зубца по высоте. После вычерчивания пазов в масштабе размеры их получаются следующими:

большой паз и зубец: $h_{п1}'=15$ мм; $b_{п1}'=4$ мм; $b_{п1}''=8{,}0$ мм; $b_{з1}'=6{,}0$ мм;

малый паз и зубец: $h_{п1}''=12$ мм; $b_{п1}'=4$ мм; $b_{п1}''=7{,}0$ мм; $b_{з1}''=4{,}0$ мм; $a_{п1}=1{,}8$ мм.

38. Сопротивление компенсационной обмотки и добавочных полюсов при $\vartheta = 75^\circ$ C

$$r_к + r_д = 1,22\frac{2(W_к + W_д)\,l_{ср1}}{5700\cdot q_к} = 1,22\cdot\frac{2(108+4)\,33}{5700\cdot 0,636} \approx 2,5 \text{ Ом},$$

где $l_{ср1} = 2(l_0 + 1,4\tau_2) = 2(6,0 + 1,4\cdot 7,72) \approx 33$ см.

Магнитная система ЭМУ

Как указывалось, магнитная система ЭМУ выполняется шихтованной (рис. 5.1).

Магнитная система второй ступени усиления

39. Э. д. с. продольной цепи якоря при нагрузке окончательно

$$E_d = U_d + I_d(r_2 + r_к + r_д) + \Delta U_{щd} = 60 + 2(3,8 + 2,5) + 2,4 = 75 \text{ В}.$$

40. Полезное поперечное поле в воздушном зазоре при нагрузке

$$\Phi_{\delta q} = \frac{60aE_d}{pnN_2} = \frac{60\cdot 1\cdot 75}{1\cdot 6000\cdot 792} = 0,945\cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

41. Окончательное значение индукции поперечного поля под краем полюсного наконечника (рис. 5.3)

$$B_{\delta q} = \frac{\Phi_{\delta q}\cdot 10^4}{b_0 l_0} = \frac{0,945\cdot 10^{-3}\cdot 10^4}{4\cdot 6,0} = 0,39 \text{ Т}.$$

42. Длина воздушного зазора

$$\delta \approx 0,4\frac{\tau_2 A_d}{B_{\delta q}}\cdot 10^{-4} = 0,4\frac{7,72\cdot 51}{0,39}\cdot 10^{-4} \approx 0,04 \text{ см};$$

примем $\delta = 0,04$ см (позиция 4).

43. Высота сердечника якоря

$$h_{с2} = \frac{D_{н2} - (2h_{п2} + d_{вл})}{2} = \frac{4,92 - (2\cdot 1,2 + 1,0)}{2} = 0,76 \text{ см},$$

где $d_{вл} \approx 0,20\cdot 4,92 \approx 1,0$ см.

44. Размеры статора ЭМУ

$$D_{н1} = D_{н2} + 2\delta + 2h'_{п1} + 2h_{с1} = 4,92 + 2\cdot 0,04 + 2\cdot 1,5 + 2\cdot 1 = 10,0 \text{ см},$$

где высота сердечника статора

$$h_{с1} = \frac{\Phi_{\delta q}\cdot 10^4}{2\cdot 0,93\cdot B_{с1} l_0} = \frac{0,945\cdot 10^{-3}\cdot 10^4}{2\cdot 0,93\cdot 0,85\cdot 6,0} = 1,0 \text{ см},$$

при этом принято $B_{с1} = 0,85$ Т.

Полученное значение наружного диаметра $D_{н1} = 100$ мм соответствует ГОСТ 6636—69 (приложение VIII).

45. М. д. с. для воздушного зазора.

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_2 + 10\delta}{t_2 - a_{п2} + 10\delta}\,\frac{t_1 + 10\delta}{t_1 - a_{п1} + 10\delta} =$$

$$= \frac{0,86 + 10\cdot 0,04}{0,86 - 0,14 + 10\cdot 0,04}\,\frac{0,82 + 10\cdot 0,04}{0,82 - 0,18 + 10\cdot 0,04} = 1,32.$$

М. д. с.

$$F_{\delta q}=1{,}6B_{\delta q}k_\delta\delta\frac{\alpha_0}{\alpha}\cdot 10^4=1{,}6\cdot 0{,}39\cdot 1{,}32\cdot 0{,}04\cdot\frac{0{,}52}{0{,}82}\cdot 10^4=210.$$

46. М. д. с. для зубцов якоря.

Индукция в зубце

$$B_{з2}=\frac{B_{\delta q}t_2}{0{,}93b''_{з2}}=\frac{0{,}39\cdot 0{,}86}{0{,}93\cdot 0{,}26}=1{,}38\ \text{Т}.$$

М. д. с.

$$F_{з2}=H_{з2}2h_{п2}=20\cdot 2\cdot 1{,}2=48,$$

где $H_{з2}=20$ — для стали марки Э31 (кривая на рис. 1.30).

47. М. д. с. для сердечника якоря.

Индукция в сердечнике

$$B_{с2}=\frac{\Phi_{\delta q}\cdot 10^4}{2\cdot 0{,}93\cdot h_{с2}l_0}=\frac{0{,}945\cdot 10^{-3}\cdot 10^4}{2\cdot 0{,}93\cdot 0{,}76\cdot 6{,}0}=1{,}12\ \text{Т}.$$

Средняя длина пути замыкания поля

$$L_{с2}\approx\frac{\pi(D_{н2}-2h_{п2}-h_{с2})}{4p}=\frac{\pi(4{,}92-2\cdot 1{,}2-0{,}76)}{4\cdot 1}\approx 1{,}4\ \text{см}.$$

М. д. с.

$$F_{с2}=H_{с2}L_{с2}=6{,}4\cdot 1{,}4=9,$$

где $H_{с2}=6{,}4$ — для стали марки Э31 (кривая на рис. 1.30).

48. М. д. с. для зубцов статора.

Индукция в зубце

$$B_{з1}=\frac{B_{\delta q}t_1}{0{,}93b''_{з1}}=\frac{0{,}39\cdot 0{,}82}{0{,}93\cdot 0{,}4}=0{,}86\ \text{Т}.$$

М. д. с.

$$F_{з1}=H_{з1}2h'_{п1}=2\cdot 2\cdot 1{,}2\approx 5{,}0.$$

где $H_{з1}=2$ — для стали марки Э31 (кривая на рис. 1.30).

49. М. д. с. для сердечника статора.

Индукция в сердечнике

$$B_{с1}=\frac{\Phi_{\delta q}\cdot 10^4}{2\cdot 0{,}93h_{с1}l_0}=\frac{0{,}945\cdot 10^{-3}\cdot 10^4}{2\cdot 0{,}93\cdot 1\cdot 6{,}0}=0{,}85\ \text{Т}.$$

Средняя длина пути замыкания поля

$$L_{с1}\approx\frac{\pi(D_{н1}-h_{с1})}{4p}=\frac{\pi(10-1{,}0)}{4\cdot 1}=7\ \text{см}.$$

М. д. с.

$$F_{с1}=H_{с1}L_{с1}=2\cdot 7=14,$$

где $H_{с1}=2$ — для стали марки Э31 (кривая на рис. 1.30).

50. Полная м. д. с. возбуждения по поперечной оси машины, создаваемая током якоря I_q

$$F_q=F_{\delta q}+F_{з2}+F_{с2}+F_{з1}+F_{с1}=210+48+9+5+14=286.$$

51. Ток в цепи поперечных щеток

$$I_q=\left[\frac{1}{\alpha}-\frac{(0,4\ :\ 0,6)}{2\alpha_0}\right]\frac{4apF_q}{N_2}=\left[\frac{1}{0,82}-\frac{0,4}{2\cdot 0,52}\right]\frac{4\cdot 1\cdot 1\cdot 286}{792}=1,2\ \text{А}.$$

52. Число витков подмагничивающей обмотки на полюс

$$W_п=0,4\frac{F_q}{2I_q}=0,4\frac{286}{2\cdot 1,2}\approx 48.$$

53. Сечение и диаметр провода подмагничивающей обмотки

$$q'_п=\frac{I_q}{j_п}=\frac{1,2}{3,2}=0,375\ \text{мм}^2.$$

По ГОСТ 7262—54 (приложение I) окончательно принимаем: $q_п = 0,374$ мм²; $d_п/d_{п.и} = 0,69/0,77$ мм; марка провода ПЭВ = 2.

Требуемая для этой обмотки площадь в большом пазу составляет

$$Q_{п.о}=\frac{W_п d^2_{п.и}}{2f_0}=\frac{48\cdot 0,77^2}{2\cdot 0,72}\approx 20\ \text{мм}^2.$$

Принятая предварительно в позиции 37 дополнительная площадь большого паза для размещения подмагничивающей обмотки равна

$$Q'_{п1}-\left(Q'_{п.и1}+Q'_{п.и1}\right)=85-(54+11)=20\ \text{мм}^2,$$

т. е. достаточна по величине.

54. Сопротивление подмагничивающей обмотки при $\vartheta = 75°$ С

$$r_п=1,22\frac{2pW_п l_{ср.п}}{5700q_п}=1,22\cdot\frac{2\cdot 48\cdot 25}{5700\cdot 0,374}\approx 1,4\ \text{Ом},$$

где $l_{ср.п}\approx 2(l_0+\alpha\tau_2)=2(6+0,82\cdot 7,72)\approx 25$ см.

Магнитная система первой ступени усиления

55. Э. д. с. якоря в цепи поперечных щеток

$$E_q=I_q(r_2+r_п)+\Delta U_{щq}=1,2(3,8+1,4)+2,4=8,6\ \text{В}.$$

56. Полезное поле управления в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta у}=\frac{60aE_q}{pnN_2}=\frac{60\cdot 1\cdot 8,6}{1\cdot 6000\cdot 792}=0,108\cdot 10^{-3}\ \text{Вб}.$$

57. Индукция в воздушном зазоре под полюсом от поля управления

$$B_{\delta у}=\frac{\Phi_{\delta у}\cdot 10^4}{\alpha\tau_2 l_0}=\frac{0,108\cdot 10^{-3}\cdot 10^4}{0,82\cdot 7,72\cdot 6}\approx 0,028\ \text{Т}.$$

58. М. д. с. для воздушного зазора

$$F_{\delta у}=1,6B_{\delta у}k_\delta\delta 10^4=1,6\cdot 0,028\cdot 1,32\cdot 0,04\cdot 10^4\approx 24.$$

59. М. д. с. коммутационной реакции якоря

$$F_{\text{к}q} = b_{\text{к}} A_q \cdot \frac{1}{1{,}7A + 1}\left(1 + \frac{0{,}2\pi\tau_2}{\delta_0\lambda_2}\cdot 10^{-8}\right) =$$

$$= 0{,}957\cdot 31\,\frac{1}{1{,}7\cdot 4{,}70 + 1}\left(1 + \frac{0{,}2\pi\cdot 7{,}72}{1{,}8\cdot 4{,}05\cdot 10^{-8}}\cdot 10^{-8}\right) = 5{,}5,$$

где

$$A_q = A_d\frac{I_q}{I_d} = 51\cdot\frac{1{,}2}{2} \approx 31 \text{ А/см};\quad A = \frac{R_{\text{щ}q}T_{\text{к}}}{L_\delta} = \frac{1\cdot 0{,}345\cdot 10^{-3}}{7{,}3\cdot 10^{-5}} = 4{,}70;$$

$$R_{\text{щ}q} = \frac{\Delta U_{\text{щ}q}}{2I_{\text{щ}}} = \frac{2{,}4}{2\cdot 1{,}2} = 1 \text{ Ом};\quad T_{\text{к}} = \frac{b_{\text{щ}}}{v_{\text{к}}} = \frac{0{,}4}{1160} = 0{,}345\cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$L_\sigma = \frac{w'_{c2}\lambda A_q l_0 b'_{\text{щ}}}{i_{aq}} = \frac{11\cdot 4{,}05\cdot 10^{-8}\cdot 31\cdot 6\cdot 0{,}532}{\frac{1{,}2}{2}} = 7{,}3\cdot 10^{-5} \text{ Г}.$$

60. Полная м. д. с. обмотки управления на пару полюсов

$$F_{\text{у}} = F_{\delta\text{у}} + F_{\text{к}q} = 24 + 5{,}5 \approx 30.$$

61. Число витков обмотки управления на полюс

$$W_{\text{у}} = \frac{F_{\text{у}}}{2I_{\text{у}}} = \frac{30}{2\cdot 0{,}02} = 750.$$

62. Сечение и диаметр провода обмотки управления

$$q_{\text{у}} = \frac{2pW_{\text{у}}l_{\text{ср. у}}}{5700\cdot r_{\text{у}}} = \frac{2\cdot 750\cdot 029}{5700\cdot 150} = 0{,}0510 \text{ мм}^2,$$

где $l_{\text{ср. у}} = 2(l_0 + \alpha\tau_2 + 2\delta_{\text{к}}) = 2(6 + 0{,}82\cdot 7{,}72 + 2\cdot 1) \approx 29$ см, $\delta_{\text{к}} \approx 1$ см — толщина катушки по оси вала.

Ближайшие размеры провода по ГОСТ 7262—54: $q_{\text{у}} = 0{,}0440$ мм²; $d_{\text{у}}/d_{\text{у. и}} = 0{,}25/0{,}30$ мм; марка провода ПЭВ-2.

63. Проверка коэффициента усиления ЭМУ по мощности

$$k_{\text{у}} = \frac{P_d}{I_{\text{у}}^2 r_{\text{у}}} = \frac{120}{0{,}02^2\cdot 150} = 2000.$$

64. Постоянные времени обмоток ЭМУ.

Постоянная времени обмотки управления

$$T_{\text{у}} = \frac{2pW_{\text{у}}\sigma_{\text{у}}\Phi_{\delta\text{у}}}{I_{\text{у}}r_{\text{у}}} = \frac{2\cdot 750\cdot 1{,}12\cdot 0{,}108\cdot 10^{-3}}{0{,}02\cdot 150} \approx 0{,}059 \text{ с}.$$

Постоянная времени цепи поперечных щеток

$$T_q = \frac{\alpha(\alpha_0 N_2 + 4apW_{\text{п}})\sigma_q\Phi_{\delta q}}{\alpha_0 4aI_q(r_2 + r_{\text{п}} + r_{\text{щ}})} =$$

$$= \frac{0{,}82(0{,}52\cdot 792 + 4\cdot 1\cdot 1\cdot 48)\,1{,}16\cdot 0{,}945\cdot 10^{-3}}{0{,}52\cdot 4\cdot 1\cdot 1{,}2(3{,}8 + 1{,}4 + 1{,}0)} = 0{,}035 \text{ с}.$$

65. Потери в обмотках якоря, добавочных полюсов, компенсационной, подмагничивающей и управления:

$$P_{м2} = \left(I_d^2 + I_q^2\right) r_2 = (2^2 + 1{,}2^2) \cdot 3{,}8 = 20{,}7 \text{ Вт};$$

$$P_{м\,(к+д)} = I_d^2 \left(r_к + r_д\right) = 2^2 \cdot 2{,}5 = 10 \text{ Вт};$$

$$P_{м.\,п} = I_q^2 r_п = 1{,}2^2 \cdot 1{,}4 = 2{,}0 \text{ Вт};$$

$$P_{м.\,у} = I_у^2 r_у = 0{,}02^2 \cdot 150 = 0{,}06 \text{ Вт};$$

$$P_м = P_{м2} + P_{м\,(к+д)} + P_{м.\,п} + P_{м.\,у} = 20{,}7 + 10 + 2{,}0 + 0{,}06 = 32{,}8 \text{ Вт}.$$

66. Переходные потери в контактах продольных и поперечных щеток и коллектора:

$$P_{к.\,щd} = \Delta U_{щd} I_d = 2{,}4 \cdot 2 = 4{,}8 \text{ Вт};$$

$$P_{к.\,щq} = \Delta U_{щq} I_q = 2{,}4 \cdot 1{,}2 = 2{,}9 \text{ Вт};$$

$$P_{к.\,щ} = P_{к.\,щd} + P_{к.\,щq} = 4{,}8 + 2{,}9 = 7{,}7 \text{ Вт}.$$

67. Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря. Масса стали

$$G_{с2} = 5{,}5\,(D_{н2} - 2h_{п2})^2\, l_0 \cdot 10^{-3} = 5{,}5\,(4{,}92 - 2 \cdot 1{,}2)^2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 0{,}21 \text{ кг};$$

$$G_{з2} = 7{,}8 \cdot z_2 b_{з2}'' h_{п2} l_0 \cdot 10^{-3} = 7{,}8 \cdot 18 \cdot 0{,}26 \cdot 1{,}2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 0{,}26 \text{ кг}.$$

Потери

$$P_{с2} = p_{с2} B_{с2}^2 G_{с2} = 8{,}85 \cdot 1{,}12^2 \cdot 0{,}21 = 2{,}32 \text{ Вт};$$

$$P_{з2} = p_{з2} B_{з2}^2 G_{з2} = 9{,}0 \cdot 1{,}38^2 \cdot 0{,}26 = 4{,}42 \text{ Вт},$$

где

$$p_{с2} = 2\varepsilon \left(\frac{f_2}{100}\right) + 2{,}5\rho \left(\frac{f_2}{100}\right)^2 = 2 \cdot 1{,}8 \left(\frac{100}{100}\right) + 2{,}5 \cdot 2{,}1 \left(\frac{100}{100}\right)^2 = 8{,}85 \text{ Вт/кг};$$

$$p_{з2} = 1{,}5\varepsilon \left(\frac{f_2}{100}\right) + 3\rho \left(\frac{f_2}{100}\right)^2 = 1{,}5 \cdot 1{,}8 \left(\frac{100}{100}\right) + 3 \cdot 2{,}1 \left(\frac{100}{100}\right)^2 = 9{,}0 \text{ Вт/кг},$$

где по табл. 1.4 для стали марки Э31 $\varepsilon = 1{,}8$; $\rho = 2{,}1$;

$$\Sigma P_с = P_{с2} + P_{з2} = 2{,}32 + 4{,}42 = 6{,}74 \text{ Вт};$$

68. Механические потери в ЭМУ

$$P_{т.\,щd} = \mu p_{щd} S_{щd}' v_к = 0{,}25 \cdot 2{,}45 \cdot 2 \cdot 0{,}2 \cdot 11{,}6 = 2{,}84 \text{ Вт};$$

$$P_{т.\,щq} = P_{т.\,щd} = 2{,}84 \text{ Вт};$$

$$P_{т.\,п} = k_т G_а n \cdot 10^{-3} = 1{,}7 \cdot 1{,}08 \cdot 6000 \cdot 10^{-3} = 11{,}0 \text{ Вт},$$

где $k_m = 1{,}7$;

$$G_а = \frac{\pi}{4}\left(D_{п2}^2 l_0 + D_к^2 l_к\right) \gamma_а \cdot 10^{-3} =$$

$$= \frac{\pi}{4}\left(4{,}92^2 \cdot 6 + 3{,}7^2 \cdot 1{,}2\right) \cdot 8{,}5 \cdot 10^{-3} = 1{,}08 \text{ Кг};$$

$$P_{т.в} = 2D_{п2}^3 n^3 l_0 \cdot 10^{-14} = 2 \cdot 4{,}92^3 \cdot 6000^3 \cdot 6 \cdot 10^{-14} = 3{,}1 \text{ Вт};$$

$$P_{мх} = 2P_{т.щd} + P_{т.п} + P_{т.в} = 2 \cdot 2{,}84 + 11{,}0 + 3{,}1 = 19{,}8 \text{ Вт}.$$

69. Общие потери в ЭМУ

$$\Sigma P = \zeta_0 (P_м + P_{к.щ} + \Sigma P_с + P_{мх}) = 1{,}09(32{,}8 + 7{,}7 + 6{,}74 + 19{,}8) = 73 \text{ Вт}.$$

70. Коэффициент полезного действия ЭМУ при номинальной нагрузке

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + \Sigma P} \cdot 100 = \frac{120}{120 + 73} \cdot 100 = 62\%.$$

ГЛАВА ШЕСТАЯ

РАСЧЕТ ОДНОЯКОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Одноякорные преобразователи постоянного тока мощностью от нескольких десятков до сотен ватт служат для преобразования постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения. Они применяются для питания анодных и сеточных цепей радиоэлектронных устройств. Преобразователи этого типа являются машинами постоянного тока с двумя независимыми рабочими обмотками в общих пазах якоря и двумя коллекторами. Они представляют собой совмещение в одном якоре и общей магнитной системе электродвигателя и генератора (рис. 6.1). Обмотка низшего напряжения является двигательной, а высшего напряжения — генераторной. Источниками энергии для приведения в действие преобразователей малой мощности служат или аккумуляторные батареи соответствующего напряжения, или же низковольтные генераторы постоянного тока.

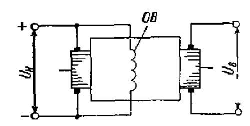


Рис. 6.1. Схема одноякорного преобразователя

Диапазон мощностей этих преобразователей составляет от 10 до 500 Вт, при этом низшее напряжение $U_н$ равно 6,12 и 24 В, высшее $U_в$ — 220, 450, 750, 1000 и 1500 В; скорость вращения 4000—10 000 об/мин.

Эти преобразователи имеют закрытое исполнение и двух- или четырехполюсную магнитную систему с одной обмоткой возбуждения, питаемой от источника со стороны коллектора низшего напряжения. Так как магнитное поле возбуждения в этих преобразователях является общим для двигательной и генераторной обмоток якоря, то соотношение между их э. д. с. определяется отношением

чисел проводников отдельных обмоток:

$$\frac{E_{В}}{E_{Н}}=\frac{N_{2В}}{N_{2Н}}; \quad (6\text{-}1)$$

но э. д. с. якоря

$$E_{Н}=U_{Н}-I_{2Н}r_{2Н}-\Delta U_{щ.\,Н},$$
$$E_{В}=U_{В}+I_{2В}r_{2В}+\Delta U_{щ.\,В}, \quad (6\text{-}2)$$

тогда напряжение на зажимах высоковольтной генераторной обмотки на основании уравнений (6-1) и (6-2) будет

$$U_{В}=(U_{Н}-I_{2Н}r_{2Н}-\Delta U_{щ.\,Н})\frac{N_{2В}}{N_{2Н}}-I_{2В}r_{2В}-\Delta U_{щ.\,В},\ \text{В}, \quad (6\text{-}3)$$

следовательно, оно зависит от напряжения источника питания преобразователя $U_{Н}$ и не может регулироваться независимо от него.

Здесь $N_{2Н}$ и $N_{2В}$ — числа проводников обмоток якоря низшего и высшего напряжения; $I_{2Н}$ и $I_{2В}$ — токи этих обмоток, А; $r_{2Н}$ и $r_{2В}$ — сопротивления их, Ом; $\Delta U_{щН}$ и $\Delta U_{щВ}$ — переходные падения напряжения в контактах соответствующей пары щеток низшего и высшего напряжения, В.

Так как токи в двигательной и генераторной обмотках якоря протекают в противоположных направлениях, то поперечные составляющие м. д. с. их в значительной мере взаимно компенсируются. Разность между ними определяется только током холостого хода преобразователя, обусловленного механическими и магнитными потерями якоря. Это позволяет уменьшить воздушный зазор и снизить расход меди и потери на возбуждение.

6-1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Основой для расчета одноякорных преобразователей постоянного тока малой мощности являются следующие данные:

выходная мощность $P_{В}$, Вт;
напряжения $U_{Н}$ и $U_{В}$, В;
скорость вращения n, об/мин;
возбуждение параллельное от низшего напряжения;
режим работы продолжительный, кратковременный;
исполнение преобразователя закрытое, защищенное.

6-2. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Определение диаметра и длины якоря преобразователя, как и в случае проектирования электродвигателей и генераторов постоянного тока малой мощности, является также важнейшим этапом расчета.

1. Расчетная мощность преобразователя

Расчетная мощность одноякорного преобразователя $P_{\text{в}}$ представляет собой произведение э. д. с. двигательной обмотки на ток якоря при нагрузке. Если приближенно положить, что потери в обмотках и контактах щеток преобразователей малой мощности составляют в среднем две трети общих потерь в них, то эта мощность

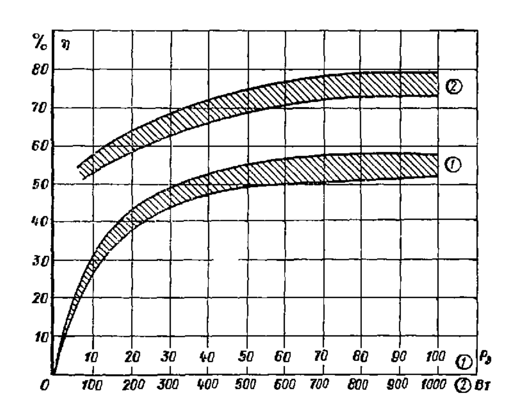


Рис. 6.2. Кривые к. п. д. малых одноякорных преобразователей постоянного тока в зависимости от полезной мощности генераторной обмотки

может быть определена по следующей формуле:

$$P_{\text{в}} = E_{\text{Н}} I_{2\text{Н}} = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_{\text{В}}, \text{ Вт},$$

где $P_{\text{В}}$ — номинальная мощность генераторной обмотки якоря по заданию, Вт; η — к. п. д. преобразователя, предварительно выбираемый по кривой рис. 6.2.

2. Токи и э. д. с. якоря при нагрузке

Величины токов и э. д. с. якоря при нагрузке преобразователя малой мощности предварительно можно определить по следующим формулам:

$$I_{2\text{Н}} = \frac{P_{\text{В}}}{\eta U_{\text{Н}}} - I_{\text{в}}; \quad I_{2\text{В}} = \frac{P_{\text{В}}}{U_{\text{В}}}, \text{ А};$$

$$E_{\text{н}} = \frac{P_a}{I_{a\text{н}}} = \frac{1+2\eta}{3\left(1-\frac{I_{\text{в}}}{I_{\text{н}}}\right)} U_{\text{н}}; \quad E_{\text{в}} \approx 0{,}9\frac{1+2\eta}{3\eta} U_{\text{в}}, \text{ В},$$

где $U_{\text{н}}$ и $U_{\text{в}}$ — номинальные напряжения машины по заданию, В; $P_{\text{в}}$ — номинальная мощность генераторной обмотки якоря по заданию, Вт; η — берется из позиции 1.

При этом величина тока возбуждения $I_{\text{в}}$ малых преобразователей обычно составляет 6—12% от величины нагрузочного тока низковольтной стороны $I_{\text{н}}$.

3. Машинная постоянная

$$C = \frac{6 \cdot 10^4}{\alpha B_\delta A_{\text{н}}} = \frac{D_{\text{п2}}^2 l_0 n}{P_a},$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре под полюсом при нагрузке, выбираемая по кривым рис. 1.2 для соответствующего режима работы в зависимости от отношения $P_{\text{в}}/n$; $A_{\text{н}}$ — линейная нагрузка якоря, выбираемая для малых преобразователей продолжительного и кратковременного режима работы на 30—40% меньше, чем соответствующее значение ее по кривым рис. 1.2 определяемое в зависимости от отношения $P_{\text{в}}/n$; $\alpha = 0{,}60 \div 0{,}70$.

4. Диаметр и расчетная длина якоря

В преобразователях постоянного тока малой мощности отношение расчетной длины пакета якоря l_0 к его диаметру или внутреннему диаметру полюсов $D_{\text{п1}}$ обычно находится в следующих пределах:

$$\xi = l_0/D_{\text{п1}} = 0{,}8 \div 1{,}2.$$

Внутренний диаметр полюсов и расчетная длина пакета якоря из формулы машинной постоянной будут

$$D_{\text{п1}} = \sqrt[3]{\frac{CP_a}{\xi n}}, \text{ см}; \quad l_0 = \xi D_{\text{п1}}; \quad \text{см},$$

где n берется по заданию; P_a — из позиции 1; C — из позиции 3.

Расчетные значения внутреннего диаметра полюсов $D_{\text{п1}}$ и длина пакета якоря l_0 обычно округляются до ближайших стандартных чисел согласно ГОСТ 6636—69 (приложение VIII), при этом окончательный диаметр якоря будет

$$D_{\text{я2}} = D_{\text{п1}} - 2\delta, \text{ см},$$

где δ — длина воздушного зазора между полюсами и якорем по позиции 10.

5. Окружная скорость якоря

$$v_2 = \frac{\pi D_{н2} n}{60} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с},$$

где n берется по заданию; $D_{н2}$ — из позиции 4.

6. Полюсный шаг и расчетная полюсная дуга

$$\tau_2 = \frac{\pi D_{н2}}{2p}, \quad b_0 = \alpha\tau_2, \text{ см},$$

где число полюсов машины принимается:

$2p = 2$ при мощностях до 200—300 Вт;

$2p = 4$ при мощностях свыше 300 Вт;

α берется из позиции 3; $D_{н2}$ — из позиции 4.

7. Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{pn}{60}, \text{ Гц}.$$

6-3. ОБМОТКА ЯКОРЯ

В преобразователях постоянного тока малой мощности при двухполюсном исполнении применяется простая петлевая обмотка, а при четырехполюсном — простая волновая обмотка якоря.

Расчет этой обмотки производится так же, как и для двухколлекторного генератора постоянного тока, по формулам позиций 8—15 гл. 1, в которых значения отдельных величин берутся: $E_н$ и $E_в$ — из позиции 2; B_δ — из позиции 3, $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4 и b_0 — из позиции 6; остальные величины определяются по ходу расчета.

8. Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

Все изложенное в гл. 1 относительно размеров пазов и проводов обмотки якоря для малых электродвигателей и генераторов постоянного тока целиком может быть отнесено и к рассматриваемым здесь преобразователям, поэтому расчет их для преобразователей производится, так же как и для двухколлекторного генератора постоянного тока, по формулам позиций 16—24 гл. 1, в которых значения отдельных величин берутся: $I_{2н}$ и $I_{2в}$ — из позиции 2; B_δ — из позиции 3; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4 и $2p$ — из позиции 6; остальные величины берутся из соответствующих последующих позиций гл. 6.

9. Коллектор, щеткодержатели и щетки

Конструктивное оформление коллектора и щеточного аппарата и их расчет для малых преобразователей производится, так же как и для двухколлекторного генератора постоянного тока, по форму-

лам позиций 25—32 гл. 1, в которых значения отдельных величин берутся: $I_{2Н}$ и $I_{2В}$ — из позиции 2; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4 и v_2 — из позиции 5; остальные величины берутся из соответствующих последующих позиций гл. 6.

6-4. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Магнитная система преобразователей постоянного тока малой мощности обычно выполняется в виде сплошного стального корпуса с отъемными цельными или шихтованными полюсами (рис. 1.13, *а*)

10. Расчет магнитной системы преобразователя

Расчет этой системы производится, так же как и рассмотренных в первом разделе малых машин постоянного тока, по формулам позиций 33—46 гл. 1 со следующим видоизменением некоторых из этих позиций.

Как указывалось выше, благодаря значительной взаимной компенсации поперечных составляющих м. д. с. двигательной и генераторной обмоток якоря преобразователя воздушный зазор под его полюсами можно допускать меньше, чем в генераторе соответствующей мощности. Поэтому формула для длины воздушного зазора в позиции 33 гл. 1 для преобразователя имеет вид:

$$\delta \approx 0{,}8\frac{\tau_2 (A_Н - A_В)}{B_\delta}\cdot 10^{-4}, \text{ см},$$

где B_δ — берется из позиции 3; τ_2 — из позиции 6; $A_Н$ и $A_В$ — линейные нагрузки низковольтной и высоковольтной обмоток якоря, полученные в соответствующих позициях настоящей главы.

При определении результирующей м. д. с. якоря преобразователя F_R по позиции 35 в последнюю нужно внести следующие изменения:

а) поперечная м. д. с. якоря F_q определяется по переходной характеристике рис. 1.14 путем перемещения вправо прямоугольника *abcd* с основанием $b_0(A_Н - A_В)$;

б) продольная и коммутационная м. д. с. якоря F_β и $F_к$ определяются отдельно для низковольтной и высоковольтной обмоток якоря:

$$F_{\beta Н} = 2b_\beta A_Н; \quad F_{\beta В} = 2b_\beta A_В;$$

$$F_{к.\,Н} = b_{к.\,Н} A_Н \frac{i_2^2 \omega}{a_{0Н} + b_{0Н} i_2 + \omega i_2}\left(1 + \frac{0{,}2\pi\tau_2}{\delta_0 \lambda_Н}\cdot 10^{-8}\right);$$

$$F_{к.\,В} = b_{к.\,В} A_В \frac{i_2^2 \omega}{a_{0В} + b_{0В} i_2 + \omega i_2}\left(1 + \frac{0{,}2\pi\tau_2}{\delta_0 \lambda_В}\cdot 10^{-8}\right),$$

где $b_{к.\,Н}$ и $b_{к.\,В}$ — ширины коммутационных зон низковольтной и высоковольтной обмоток якоря, вычисляемые по формуле пози-

ции 32; $\lambda_н$ и $\lambda_в$ — берутся из позиции 32; $a_{0н}$, $b_{0н}$ и $a_{0в}$, $b_{0в}$ — вычисляются по формулам позиции 45 для низковольтной и высоковольтной обмоток якоря;

в) результирующая м. д. с. якоря преобразователя будет

$$F_R = F_q - (F_{\beta н} - F_{\beta в}) - (F_{к.\,н} - F_{к.\,в}).$$

Наконец, определение полной м. д. с. возбуждения преобразователя при нагрузке $F_в$ по позиции 46 производится, так же как и в электродвигателе параллельного возбуждения, с помощью э. д. с. якоря $E_н = U_н - I_{2н} r_{2н} - \Delta U_{щ.\,н}$ и характеристики холостого хода (рис. 1.15) $F_в = F'_р + F_R$, где $U_н$ берется по заданию; $I_{2н}$, $r_{2н}$ и $\Delta U_{щ.\,н}$ — из соответствующих позиций; F_R — из позиции 45 с указанными изменениями; $F'_р$ — из рис. 1.15.

11. Расчет обмотки возбуждения

Расчет обмотки возбуждения преобразователя малой мощности производится так же, как и электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения, по формулам позиций 55—59 первой главы.

12. Потери и к. п. д. преобразователя

Расчет потерь и к. п. д. преобразователя производится, так же как и двухколлекторного генератора постоянного тока, по формулам позиций 60—65 гл. 1.

К. п. д. преобразователя будет

$$\eta = \frac{P_в}{P_в + \sum P} \cdot 100$$

и потребляемый им ток от источника низшего напряжения

$$I_н = \frac{P_в + \sum P}{U_н},$$

где $U_н$ и $P_в$ — номинальные напряжение и мощность по заданию; $\sum P$ — общие потери в преобразователе по позиции 65.

К. п. д. малых одноякорных преобразователей дан в виде кривых на рис. 6.2.

Пример расчета одноякорного преобразователя

Задание

Выходная мощность $P_в = 180$ Вт;
напряжения $U_н = 24$ В и $U_в = 450$ В;
скорость вращения $n = 7500$ об/мин;
возбуждение параллельное от коллектора низшего напряжения;
режим работы продолжительный;
исполнение преобразователя закрытое.

Основные размеры преобразователя

1. Расчетная мощность преобразователя

$$P_а = \frac{1+2\eta}{3\eta} P_В = \frac{1+2\cdot 0{,}60}{3\cdot 0{,}60}\cdot 180 = 220 \text{ Вт},$$

где по кривой рис. 6.2 принято $\eta = 0{,}60$.

2. Токи и э. д. с. якоря при нагрузке

$$I_{2Н} = \frac{P_В}{\eta U_Н} - I_в = \frac{180}{0.60\cdot 24} - 1{,}2 = 11{,}3\text{А};$$

$$I_{2В} = \frac{P_В}{U_В} = \frac{180}{450} = 0{,}4\text{А};$$

$$E_Н = \frac{1+2\eta}{3\left(1-\frac{I_в}{I_Н}\right)} U_Н = \frac{1+2\cdot 0{,}60}{3(1-0{,}1)}\cdot 24 = 19{,}6 \text{ В};$$

$$E_В = 0{,}9\frac{1+2\eta}{3\eta} U_В = 0{,}9\cdot\frac{1+2\cdot 0{,}60}{3\cdot 0{,}60}\cdot 450 \approx 500 \text{ В},$$

где принято $I_в/I_Н = 0{,}10$.

3. Машинная постоянная

$$C = \frac{6\cdot 10^4}{\alpha B_\delta A_Н} = \frac{6\cdot 10^4}{0{,}66\cdot 0{,}36\cdot 60} \approx 4200,$$

где принято: $\alpha = 0{,}66$ и согласно кривым на рис. 1.2 для $P_В/n = 24\cdot 10^{-3}$,

$$B_\delta = 0{,}36;\ A_Н = 0{,}64\cdot 94 = 60 \text{ А/см}.$$

4. Внутренний диаметр полюсов и расчетная длина якоря

$$D_{пı} = \sqrt[3]{\frac{CP_а}{\xi n}} = \sqrt[3]{\frac{4200\cdot 220}{1\cdot 7500}} = 5{,}0 \text{ см};$$

$$l_0 = \xi D_{пı} = 1\cdot 5{,}0 = 5{,}0 \text{ см},$$

где принято $\xi = 1$, материал якоря — листовая электротехническая сталь марки Э11 толщиной 0,5 мм (ГОСТ 802—58, приложение IV).

Окончательно по ГОСТ 6636—69 (приложение VIII) принимаем: $D_{пı} = 50$ мм; $D_{н2} = D_{пı} - 2\delta = 50 - 2\cdot 0{,}25 = 49{,}5$ мм; $l_0 = 50$ мм; $\delta = 0{,}25$ мм (позиция 33).

5. Окружная скорость якоря

$$v_2 = \frac{\pi D_{н2} n}{60}\cdot 10^{-2} = \frac{\pi\cdot 4{,}95\cdot 7500}{60}\cdot 10^{-2} = 19{,}4 \text{ м/с}.$$

6. Полюсный шаг и расчетная полюсная дуга

$$\tau_2 = \frac{\pi D_{н2}}{2p} = \frac{\pi\cdot 4{,}95}{2} = 7{,}8 \text{ см};\quad b_п = \alpha\tau_2 = 0{,}66\cdot 7{,}8 = 5{,}15 \text{ см},$$

где принято $2p = 2$.

7. Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 7500}{60} = 125 \text{ Гц}.$$

Обмотка якоря

8. Полезное поле полюса в воздушном зазоре при нагрузке преобразователя

$$\Phi_\delta = B_\delta b_0 l_0 \cdot 10^{-4} = 0{,}36 \cdot 5{,}15 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-4} = 0{,}93 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

9. Число проводников обмоток якоря

$$N_{2\text{Н}} = \frac{60aE_\text{Н}}{pn\Phi_\delta} = \frac{60 \cdot 1 \cdot 19{,}6}{1 \cdot 7500 \cdot 0{,}93 \cdot 10^{-3}} \approx 170;$$

$$N_{2B} = N_{2\text{Н}} \frac{E_\text{В}}{E_\text{Н}} = 170 \frac{500}{19{,}6} = 4330.$$

10. Число пазов якоря

$$z_2 = (3 \div 4)\, D_{\text{н}2} = (3 \div 4)\, 4{,}95 \approx 14 \div 19;$$

примем $z_2 = 15$; в целях уменьшения зубцовых пульсаций напряжения на коллекторе предусматривается скос пазов якоря на одно пазовое деление.

11. Число коллекторных пластин:

$$K_\text{Н} = 2z_2 = 2 \cdot 15 = 30;$$

$$K_\text{В} = 3z_2 = 3 \cdot 15 = 45.$$

12. Число витков в секциях обмоток якоря:

$$w'_{\text{с. Н}} = \frac{N_{2\text{Н}}}{2K_\text{Н}} = \frac{180}{2 \cdot 30} = 3;$$

$$w'_{\text{с. В}} = \frac{N_{2\text{В}}}{2K_\text{В}} = \frac{4320}{2 \cdot 45} = 48,$$

где окончательно принято

$$N_{2\text{Н}} = 180; \; N_{2\text{В}} = 4320,$$

при этом $B'_\delta = B_\delta \frac{170}{180} = 0{,}36 \cdot \frac{170}{180} = 0{,}35$ Т;

$$\Phi'_\delta = 0{,}93 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{170}{180} = 0{,}88 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

13. Число проводников в пазу якоря:

$$N_{\text{п. Н}} = \frac{N_{2\text{Н}}}{z_2} = \frac{180}{15} = 12;$$

$$N_{\text{пВ}} = \frac{N_{2\text{В}}}{z_2} = \frac{4320}{15} = 288.$$

14. Шаги обмоток якоря по секциям и коллектору:

$$y_{1Н}=\frac{K_Н}{2p}-\varepsilon=\frac{30}{2}-0=15;\; y_{2Н}=y_{1Н}-1=15-1=14;\; y=1;\; y_к=1;$$

$$y_{1В}=\frac{K_В}{2p}-\varepsilon=\frac{45}{2}-0,25=22;\; y_{2В}=y_{1В}-1=22-1=21;$$

шаг обмоток по пазам

$$y_п=\frac{z_2}{2p}-\varepsilon=\frac{15}{2}-0,5=7.$$

15. Окончательные величины линейных нагрузок якоря:

$$A_Н=\frac{N_{2Н}I_{2Н}}{2\pi D_{н2}}=\frac{180\cdot 11,3}{2\pi\cdot 4,95}\approx 65 \text{ А/см};$$

$$A_В=\frac{N_{2В}I_{2В}}{2\pi D_{н2}}=\frac{4320\cdot 0,4}{2\pi\cdot 4,95}\approx 55 \text{ А/см}.$$

Размеры зубцов, пазов и проводов обмоток якоря

16. Предварительный выбор плотностей тока в обмотках якоря. Удельная тепловая загрузка якоря

$$q=\alpha'\,\Delta\vartheta_m(1+0,1v_2)=0,10(1+0,1\cdot 19,4)=0,294 \text{ Вт/см}^2.$$

Допустимая плотность тока в обмотках якоря в среднем:

$$j'_{2Н}=\frac{1400q}{A_Н}=\frac{1400\cdot 0,294}{65}=6,3 \text{ А/мм}^2;$$

$$j'_{2В}=\frac{1400q}{A_В}=\frac{1400\cdot 0,294}{55}=7,5 \text{ А/мм}^2.$$

17. Сечение и диаметр провода обмоток якоря. Предварительно:

$$q'_{2Н}=\frac{I_{2Н}}{2j'_{2Н}}=\frac{11,3}{2\cdot 6,3}=0,895 \text{ мм}^2;$$

$$q'_{2В}=\frac{I_{2В}}{2j'_{2В}}=\frac{0,4}{2\cdot 7,5}=0,0267 \text{ мм}^2.$$

Окончательно принимаем по данным ГОСТ 7262—54 и ГОСТ 6324—52 (приложение I):

$$q_{2Н}=0,850 \text{ мм}^2;\quad d_{2Н}/d_{2Н.и}=1,04/1,15 \text{ мм, марка ПЭВ-2};$$

$$q_{2В}=0,0254 \text{ мм}^2;\quad d_{2В}/d_{2В.и}=0,18/0,255 \text{ мм, марка ПЭЛШО}.$$

18. Окончательные плотности тока в проводниках обмоток якоря:

$$j_{2H} = \frac{I_{2H}}{2q_{2H}} = \frac{11,3}{2 \cdot 0,850} = 6,65 \text{ А/мм}^2;$$

$$j_{2B} = \frac{I_{2B}}{2q_{2B}} = \frac{0,4}{2 \cdot 0,0254} = 7,85 \text{ А/мм}^2.$$

19. Площадь сечения паза якоря.

Площадь паза якоря, занимаемая изолированными проводниками,

$$Q_{п.\,пH} = \frac{N_{п.\,H} d^2_{2H.\,и}}{f_0} = \frac{12 \cdot 1,15^2}{0,74} = 21,4 \text{ мм}^2;$$

$$Q_{п.\,пB} = \frac{N_{п.\,B} d^2_{2B.\,и}}{f_0} = \frac{288 \cdot 0,255^2}{0,74} = 25,4 \text{ мм}^2;$$

площадь паза, занимаемая пазовой изоляцией,

$$Q_{п.\,и} = \delta_и \Pi = 0,35 \cdot 30 = 10,5 \text{ мм}^2,$$

где принято $\Pi \approx 0,6 \cdot D_{н2} = 0,6 \cdot 49,5 \approx 30$ мм; $\delta_и = 0,35$ мм — лакоткань ЛШ1 — 0,15 мм (ГОСТ 2214—60, приложение II) и электрокартон ЭВ — 0,2 мм (ГОСТ 2824—60, приложение III);

площадь паза, занимаемая клином,

$$Q_{п.\,к} = b_{кл} h_{кл} = 3 \cdot 0,6 \approx 2,0 \text{ мм}^2;$$

общая потребная площадь сечения паза (с учетом скоса пазов на одно пазовое деление)

$$Q_п = \frac{Q_{п.\,п.\,H} + Q_{п.\,п.\,B} + Q_{п.\,и} + Q_{п.\,к}}{\cos\gamma} =$$

$$= \frac{21,4 + 25,4 + 10,5 + 2}{0,96} = 62 \text{ мм}^2,$$

где $\cos\gamma = \frac{l_0}{\sqrt{t_2^2 + l_0^2}} = \frac{5,0}{\sqrt{1,04^2 + 5,0^2}} = 0,96.$

20. Коэффициент заполнения паза изолированным проводом

$$k_{п.\,и} = \frac{N_{п.H} q_{2H.\,и} + N_{п.\,B} q_{2B.\,и}}{Q_п \cos\gamma} = \frac{12 \cdot 1,03 + 288 \cdot 0,0502}{62 \cdot 0,96} = 0,45,$$

что для двухобмоточного якоря допустимо.

21. Размеры паза и зубцов якоря.

Примем трапецеидальную форму паза с одинаковой толщиной зубца по его высоте. Согласно рис. 1.3, *б* получается:

$$b'_{п2} = 7,0 \text{ мм}; \quad b''_{п2} = 2,5 \text{ мм}; \quad h_{п2} = 13,0 \text{ мм}; \quad b''_{з2} = 2,5 \text{ мм}.$$

Ширина прорези

$$a_{п2} = (2 \div 8)\, d_{2H.\,и} = 2,0 \cdot 1,15 \approx 2,3 \text{ мм};$$

примем $a_{п2} = 2,2$ мм.

Шаги по вершинам зубцов якоря

$$t_2 = \frac{\pi D_{н2}}{z_2} = \frac{\pi \cdot 4{,}95}{15} = 1{,}04 \text{ см}.$$

Размеры зубца:

$$b'_{з2} = t_2 - a_{п2} = 1{,}04 - 0{,}22 = 0{,}82 \text{ см};$$

$$b''_{з2} = 0{,}25 \text{ см — согласно рис. 1.3, } б.$$

Проверка максимальной индукции в минимальном сечении зубца

$$B_{з2} = \frac{B_\delta t_2}{0{,}93 \cdot b''_{з2}} = \frac{0{,}35 \cdot 1{,}04}{0{,}93 \cdot 0{,}25} = 1{,}57 \text{ Т},$$

что допустимо.

Обмотку высшего напряжения располагаем в низу паза под обмоткой низшего напряжения.

22. Средняя длина одного проводника обмоток якоря

$$l_{ср2} = l_0 + 1{,}2D_{н2} = 5{,}0 + 1{,}2 \cdot 4{,}95 \approx 11{,}0 \text{ см}.$$

23. Сопротивления обмоток якоря в нагретом состоянии при 75° С:

$$r_{2Н} = 1{,}22 \frac{N_{2Н} l_{ср2}}{5700 \cdot 4q_{2Н}} = 1{,}22 \frac{180 \cdot 11{,}0}{5700 \cdot 4 \cdot 0{,}850} = 0{,}125 \text{ Ом};$$

$$r_{2В} = 1{,}22 \frac{N_{2В} l_{ср2}}{5700 \cdot 4q_{2В}} = 1{,}22 \frac{4320 \cdot 11{,}0}{5700 \cdot 4 \cdot 0{,}0254} = 100 \text{ Ом}.$$

24. Падения напряжения в обмотках якоря при полной нагрузке:

$$\Delta U_{2Н} = I_{2Н} r_{2Н} = 11{,}3 \cdot 0{,}125 = 1{,}4 \text{ В, или } \frac{1{,}4}{24} \cdot 100 = 5{,}9\%;$$

$$\Delta U_{2В} = I_{2В} r_{2В} = 0{,}4 \cdot 100 = 40 \text{ В, или } \frac{40}{450} \cdot 100 = 8{,}9\%,$$

что допустимо.

Коллекторы и щетки

25. Предварительные величины диаметров коллекторов:

$$D'_{к.\,Н} = (0{,}5 \div 0{,}9)\, D_{н2} = 0{,}6 \cdot 4{,}95 \approx 3{,}0 \text{ см};$$

$$D'_{к.\,В} = (0{,}5 \div 0{,}9)\, D_{н2} = 0{,}8 \cdot 4{,}95 \approx 3{,}9 \text{ см}.$$

26. Ширины коллекторных пластин.

Коллекторные деления:

$$t'_{к.\,Н} = \frac{\pi D'_{к.\,Н}}{K_Н} = \frac{\pi \cdot 30}{30} = 3{,}14 \text{ мм};$$

$$t'_{к.\,В} = \frac{\pi D'_{к.\,В}}{K_В} = \frac{\pi \cdot 39}{45} = 2{,}74 \text{ мм}.$$

Примем

$$\beta_{к.\,н} = 2{,}0 \text{ мм}; \quad \beta_{и.\,н} = 0{,}5 \text{ мм};$$

$$\beta_{к.\,в} = 2{,}0 \text{ мм}; \quad \beta_{и.\,в} = 0{,}6 \text{ мм}.$$

Окончательные коллекторные деления

$$t_{к.\,н} = \beta_{к.\,н} + \beta_{и.\,н} = 2{,}0 + 0{,}5 = 2{,}5 \text{ мм};$$

$$t_{к.\,в} = \beta_{к.\,в} + \beta_{и.\,в} = 2{,}0 + 0{,}6 = 2{,}6 \text{ мм}.$$

27. Окончательные диаметры коллекторов и окружные скорости их:

$$D_{к.\,н} = \frac{K_н t_{к.\,н}}{\pi} = \frac{30 \cdot 2{,}5}{\pi} = 24 \text{ мм};$$

$$D_{к.\,в} = \frac{K_в t_{к.\,в}}{\pi} = \frac{45 \cdot 2{,}6}{\pi} = 37 \text{ мм};$$

$$v_{к.\,н} = \frac{\pi D_{к.\,н} n}{60} \cdot 10^{-2} = \frac{\pi \cdot 2{,}4 \cdot 7500}{60} \cdot 10^{-2} = 9{,}4 \text{ м/с};$$

$$v_{к.\,в} = \frac{\pi D_{к.\,в} n}{60} \cdot 10^{-2} = \frac{\pi \cdot 3{,}7 \cdot 7500}{60} \cdot 10^{-2} = 14{,}5 \text{ м/с}.$$

28. Сорт щеток и плотность тока под щетками.

Примем для низковольтного коллектора щетки марки М-6, для высоковольтного коллектора щетки марки ЭГ-8; тогда согласно табл. 1-1 данные этих щеток:

$j'_{щ.\,н} = 15$ А/см²; $\Delta U_{щ.\,н} = 1{,}5$ В; $\mu_н = 0{,}20$; $p_{щ.\,н} = 1{,}96$ Н/см²
(или 0,20 кг/см²);

$j'_{щ.\,в} = 10$ А/см²; $\Delta U_{щ.\,н} = 2{,}4$ В; $\mu_в = 0{,}25$; $p_{щ.\,в} = 2{,}45$ Н/см²
(или 0,25 кг/см²).

29. Площади сечения щеток и их размеры:

$$S'_{щ.\,н} = \frac{I_{2н}}{p j'_{щ.\,н}} = \frac{11{,}3}{1 \cdot 15} = 0{,}75 \text{ см}^2;$$

$$S'_{щ.\,в} = \frac{I_{2в}}{p j'_{щ.\,в}} = \frac{0{,}4}{1{,}10} = 0{,}04 \text{ см}^2.$$

Примем размеры щеток по ГОСТ 12237—71:

$S_{щ.\,н} = a_{щ.\,н} b_{щ.\,н} = 1{,}0 \cdot 0{,}63 = 0{,}63$ см²; $a_{щ.\,н} = 1{,}0$ см; $b_{щ.\,н} = 0{,}63$ см;

$S_{щ.\,в} = a_{щ.\,в} b_{щ.\,в} = 0{,}32 \cdot 0{,}25 = 0{,}08$ см²; $a_{щ.\,в} = 0{,}32$ см; $b_{щ.\,в} = 0{,}25$ см.

Высота щеток

$$h_{щ.\,н} = (1{,}5 \div 2{,}0)\, a_{щ.\,н} = 2 \cdot 1{,}0 = 2{,}0 \text{ см};$$

$$h_{щ.\,в} = (1{,}5 \div 2{,}0)\, a_{щ.\,в} = 2 \cdot 0{,}32 \approx 0{,}64 \text{ см};$$

примем $h_{щ.\,в} = 0{,}8$ см.

30. Окончательные плотности тока под щетками:

$$j_{щ.\,н} = \frac{I_{2н}}{p a_{щ.\,н} b_{щ.\,н}} = \frac{11,3}{1\cdot 1\cdot 0,63} = 18 \text{ А/см}^2;$$

$$j_{щ.\,в} = \frac{I_{2в}}{p a_{щ.\,в} b_{щ.\,в}} = \frac{0,4}{1\cdot 0,32\cdot 0,25} = 5 \text{ А/см}^2.$$

31. Длины коллекторов.
Активные длины коллекторов по оси вала:

$$l'_{к.\,н} = (1,5 \div 2,0)\, a_{щ.\,н} = 1,7\cdot 1,0 = 1,7 \text{ см};$$

$$l'_{к.\,в} = (1,5 \div 2,0)\, a_{щ.\,в} = 2\cdot 0,32 \approx 0,7 \text{ см}.$$

Полные длины коллекторов по оси вала:

$$l_{к.\,н} = l'_{к.\,н} + (3 \div 5)\, d_{2н} = 1,7 + 3,0\cdot 0,104 = 2,0 \text{ см};$$

$$l_{к.\,в} = l'_{к.\,в} + (3 \div 5)\, d_{2в} = 0,7 + 5\cdot 0,018 \approx 0,8 \text{ см}.$$

32. Проверка коммутации.
Ширины коммутационных зон:

$$b_{к.\,н} = b'_{щ.\,н} + \left[u_н + \left|\frac{K_н}{2p} - y_{1н}\right| - \frac{a}{p}\right] t'_{к.\,н} =$$

$$= 1,3 + \left[2 + \left|\frac{30}{2} - 15\right| - \frac{1}{1}\right]\cdot 0,515 = 1,81 \text{ см};$$

$$b_{к.\,в} = b'_{щ.\,в} + \left[u_в + \left|\frac{K_в}{2p} - y_{1в}\right| - \frac{a}{p}\right] t'_{к.\,в} =$$

$$= 0,335 + \left[3 + \left|\frac{45}{2} - 22\right| - \frac{1}{1}\right]\cdot 0,348 = 1,20 \text{ см},$$

что вполне допустимо, так как

$$b_{к.\,н} < 0,8(\tau_2 - b_0) = 0,8\,(7,8 - 5,15) = 2,12 \text{ см};$$

при этом:

$$b'_{щ.\,н} = b_{щ.\,н} \frac{D_{н2}}{D_{к.\,н}} = 0,63\cdot\frac{4,95}{2,4} = 1,3 \text{ см};$$

$$t'_{к.\,н} = t_{к.\,н} \frac{D_{н2}}{D_{к.\,н}} = 0,25\cdot\frac{4,95}{2,4} = 0,515 \text{ см};$$

$$b'_{щ.\,в} = b_{щ.\,в} \frac{D_{н2}}{D_{к.\,в}} = 0,25\cdot\frac{4,95}{3,7} = 0,335 \text{ см};$$

$$t'_{к.\,в} = t_{к.\,в} \frac{D_{н2}}{D_{к.\,в}} = 0,26\cdot\frac{4,95}{3,7} = 0,348 \text{ см}.$$

Так как согласно укладке обмоток в пазы обмотка высшего напряжения, расположенная в низу паза, занимает около 60% площади паза, а обмотка низшего напряжения — 40%, то высоты обмоток в пазу составляют: $h_{\text{Н}} = 5{,}0$ мм, $h_{\text{В}} = 8$ мм.

Удельные магнитные проводимости для полей рассеяния обмоток якоря при трапецеидальных пазах будут:

$$\lambda_{\text{Н}} = \left[0{,}6\frac{2h_{\text{Н}}}{b_{\text{п2}} + b_{\text{п2}}} + \frac{l_{\text{л}}}{l_0} + 0{,}92 \log\left(\frac{\pi l_2}{a_{\text{п2}}}\right)\right] \cdot 10^{-8} =$$

$$= \left[0{,}6\frac{2 \cdot 5{,}0}{7{,}8 + 5{,}8} + \frac{1{,}2 \cdot 4{,}95}{5{,}0} + 0{,}92 \log\left(\frac{\pi \cdot 1{,}04}{0{,}22}\right)\right] \cdot 10^{-8} =$$

$$= 2{,}73 \cdot 10^{-8} \text{ Вб/(А} \cdot \text{см)},$$

$$\lambda_{\text{В}} = \left[0{,}6\frac{2 \cdot h_{\text{В}}}{b_{\text{п2}} + b_{\text{п2}}} + \frac{l_{\text{л}}}{l_0} + 0{,}92 \log\left(\frac{\pi l_2}{a_{\text{п2}}}\right)\right] \cdot 10^{-8} =$$

$$= \left[0{,}6\frac{2 \cdot 8}{5{,}8 + 2{,}5} + \frac{1{,}2 \cdot 4{,}95}{5{,}0} + 0{,}92 \log\left(\frac{\pi \cdot 1{,}04}{0{,}22}\right)\right] \cdot 10^{-8} =$$

$$= 3{,}42 \cdot 10^{-8} \text{ Вб/(А} \cdot \text{см)}.$$

Средние значения реактивных э. д. с. в короткозамкнутых секциях якоря

$$e_{\text{р. Н}} = 2w_{\text{с. Н}} l_0 \lambda_{\text{Н}} A_{\text{Н}} v_2 \cdot 10^2 = 2 \cdot 3 \cdot 5{,}0 \cdot 2{,}73 \cdot 10^{-8} \cdot 65 \cdot 19{,}4 \cdot 10^2 = 0{,}10 \text{ В};$$

$$e_{\text{р. В}} = 2w_{\text{с. В}} l_0 \lambda_{\text{В}} A_{\text{В}} v_2 \cdot 10^2 = 2 \cdot 48 \cdot 5{,}0 \cdot 3{,}42 \cdot 10^{-8} \cdot 55 \cdot 19{,}4 \cdot 10^2 = 1{,}75 \text{ В}.$$

Э. д. с. от поля якоря в короткозамкнутых секциях

$$e_{\text{а. Н}} = \frac{0{,}4\pi w_{\text{с. Н}} (A_{\text{Н}} - A_{\text{В}}) \tau_2 l_0 v_2 \cdot 10^{-6}}{\delta_0} =$$

$$= \frac{0{,}4\pi \cdot 3\,(65 - 55) \cdot 7{,}8 \cdot 5{,}0 \cdot 19{,}4 \cdot 10^{-6}}{1{,}32} = 0{,}021 \text{ В};$$

$$e_{\text{а. В}} = \frac{0{,}4\pi w_{\text{с. В}} (A_{\text{Н}} - A_{\text{В}}) \tau_2 l_0 v_2 \cdot 10^{-6}}{\delta_0} =$$

$$= \frac{0{,}4\pi \cdot 48\,(65 - 55) \cdot 7{,}8 \cdot 5{,}0 \cdot 19{,}4 \cdot 10^{-6}}{1{,}32} = 0{,}34 \text{ В},$$

где $\delta_0 \approx \frac{\tau_2 - b_0}{2} = \frac{7{,}8 - 5{,}15}{2} = 1{,}32$ см.

Средние значения результирующих э. д. с. в короткозамкнутых секциях:

$$e_{\text{Н}} = e_{\text{р. Н}} + e_{\text{а. Н}} = 0{,}10 + 0{,}02 = 0{,}12 \text{ В};$$

$$e_{\text{В}} = e_{\text{р. В}} + e_{\text{а. В}} = 1{,}75 + 0{,}34 = 2{,}09 \text{ В};$$

хотя э. д. с. $e_{\text{В}}$ получилась несколько повышенной, однако здесь это допустимо вследствие благоприятного взаимного влияния двух обмоток друг на друга при коммутации токов в них.

Расчет магнитной системы преобразователя

Магнитную систему преобразователя примем с отъемными шихтованными полюсами согласно рис. 1.13, *а*.

33. Длина воздушного зазора под полюсом

$$\delta \approx 0{,}8\frac{\tau_2\left(A_Н - A_В\right)}{B_\delta}\cdot 10^{-4} = 0{,}8\frac{7{,}8\,(65-55)}{0{,}35}\cdot 10^{-4} = 0{,}018 \text{ см};$$

примем $\delta = 0{,}25$ мм.

34. Высота сердечника якоря

$$h_{c2} = \frac{D_{н2} - (2h_{п2} + d_{вл})}{2} = \frac{4{,}95 - (2\cdot 1{,}3 + 1{,}0)}{2} \approx 0{,}67 \text{ см},$$

где диаметр вала принят:

$$d_{вл} = (0{,}18 \div 0{,}24)\cdot D_{н2} = 0{,}20\cdot 4{,}95 \approx 1{,}0 \text{ см}.$$

Проверка индукции в сердечнике якоря

$$B_{c2} = \frac{\Phi_\delta\cdot 10^4}{2\cdot 0{,}93 h_{c2} l_0} = \frac{0{,}88\cdot 10^{-3}\cdot 10^4}{2\cdot 0{,}93\cdot 0{,}67\cdot 5{,}0} = 1{,}41 \text{ Т},$$

что допустимо.

35. Размеры полюса.

Осевая длина

$$l_п = l_0 = 5{,}0 \text{ см}.$$

Высоту сердечника полюса предварительно примем:

$$h_п = (0{,}25 \div 0{,}40)\,D_{н2} = 0{,}28\cdot 4{,}95 \approx 1{,}4 \text{ см}.$$

Сечение сердечника полюса

$$Q_п = \frac{\Phi_\delta\sigma\cdot 10^4}{B_п} = \frac{0{,}88\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}1\cdot 10^4}{1{,}3} \approx 7{,}5 \text{ см}^2,$$

где принято $B_п = 1{,}3$ Т.

Полюсы выполняются шихтованными; материал — листовая электротехническая сталь марки Э11 толщиной 0,5 мм (ГОСТ 802—58, приложение IV).

Ширина сердечника полюса

$$b_п = \frac{Q_п}{k_2 l_п} = \frac{7{,}5}{0{,}95\cdot 5{,}0} \approx 1{,}6 \text{ см}.$$

36. Размеры станины.

Поперечное сечение

$$Q_{c1} = \frac{\Phi_\delta\sigma\cdot 10^4}{2B_{c1}} = \frac{0{,}88\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}1\cdot 10^4}{2\cdot 1{,}2} = 4 \text{ см}^2,$$

где принято $B_{c1} = 1{,}2$ Т; материал — корпусная сталь 10.

Осевая длина

$$l_{c1} = l_0 + (3 \div 5) \text{ см} = 5 + 3 = 8{,}0 \text{ см}.$$

Высота

$$h_{c1} = \frac{Q_{c1}}{k_2 l_{c1}} = \frac{4}{1\cdot 8} = 0{,}5 \text{ см}.$$

37. Эскиз магнитной системы преобразователя (в масштабе).

Из эскиза магнитной системы преобразователя получаются следующие средние длины путей магнитного поля на каждом участке: $L_{c1} = 14$ см; $L_п = 2h_п = 2 \cdot 1,4 = 2,8$ см; $L_\delta = 2\delta = 2 \cdot 0,025 = 0,05$ см; $L_{з2} = 2h_{п2} = 2 \cdot 1,3 = 2,6$ см;

$$L_{c2} = \frac{\pi (D_{н2} - 2h_{п2} - h_{c2})}{2p} = \frac{\pi (4,95 - 2 \cdot 1,3 - 0,67)}{2} \approx 2,6 \text{ см}.$$

38. М. д. с. для воздушного зазора.

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = \frac{t_2 + 10\delta}{b'_{з2} + 10\delta} = \frac{1,04 + 10 \cdot 0,025}{0,82 + 10 \cdot 0,025} = 1,21.$$

М. д. с.

$$F_\delta = 1,6 B_\delta k_\delta \delta \cdot 10^4 = 1,6 \cdot 0,35 \cdot 1,21 \cdot 0,025 \cdot 10^4 = 170.$$

39. М. д. с. для зубцов якоря.

Индукция в сечении зубца

$$B_{з2} = \frac{B_\delta t_2}{0,93 b''_{з2}} = \frac{0,35 \cdot 1,04}{0,93 \cdot 0,25} = 1,56 \text{ Т}.$$

М. д. с.

$$F_{з2} = H_{з2} L_{з2} = 18 \cdot 2,6 = 47,$$

где $H_{з2} = 18$ — для стали марки Э11 (кривая на рис. 1.30).

40. М. д. с. для сердечника якоря.

Индукция в сердечнике якоря

$$B_{c2} = \frac{\Phi_\delta \cdot 10^4}{2 \cdot 0,93 h_{c2} l_0} = \frac{0,88 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4}{2 \cdot 0,93 \cdot 0,67 \cdot 5,0} = 1,41 \text{ Т}.$$

М. д. с.

$$F_{c2} = H_{c2} L_{c2} = 16 \cdot 2,6 = 42,$$

где $H_{c2} = 16$ — для стали марки Э11 (кривая на рис. 1.30).

41. М. д. с. для сердечников полюсов.

Индукция в сердечнике полюса

$$B_п = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{k_2 b_п l_п} = \frac{0,88 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^4}{0,95 \cdot 1,6 \cdot 5,0} = 1,27 \text{ Т}.$$

М. д. с.

$$F_п = H_п L_п = 8 \cdot 2,8 \approx 22,$$

где $H_п = 8$ — для стали марки Э11 (кривая на рис. 1.30).

42. М. д. с. для станины.

Индукция в станине

$$B_{c1} = \frac{\Phi_\delta \sigma \cdot 10^4}{2 k_2 h_{c1} l_{c1}} = \frac{0,88 \cdot 10^{-3} \cdot 1,1 \cdot 10^4}{2 \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 8} = 1,21 \text{ Т}.$$

М. д. с.

$$F_{c1} = H_{c1} L_{c1} = 8,2 \cdot 14 = 115,$$

где $H_{c1} = 8,2$ — для стали 10 (кривая на рис. 1.31).

43. М. д. с. для воздушного зазора в стыке между станиной и отъемными полюсами.

Индукция в зазоре стыка

$$B_{сб} = B_{п} = 1{,}27 \text{ Т}.$$

М. д. с.

$$F_{сб} = 1{,}6 B_{сб} \delta_c \cdot 10^4 = 1{,}6 \cdot 1{,}27 \cdot 0{,}004 \cdot 10^4 = 81.$$

44. Характеристика холостого хода преобразователя.

Расчет этой характеристики производится по табл. 1.3 гл. 1.

45. М. д. с. реакции якоря.

Поперечная м. д. с. якоря. Так как эта м. д. с. определяется по переходной характеристике рис. 1.14 путем перемещения вправо прямоугольника $qbcd$ с основанием $b_0 (A_Н - A_В)$, то они в преобразователях обычно получаются небольшими и в данном примере составляют $F_q = 12$.

Продольная м. д. с. якоря:

$$F_{\beta Н} = 2b_\beta A_Н = 2 \cdot 0{,}02 \cdot 65 \approx 2;$$

$$F_{\beta В} = 2b_\beta A_В = 2 \cdot 0{,}02 \cdot 55 \approx 2.$$

Коммутационная м. д. с. якоря:

$$F_{к.\,Н} = b_{к.\,Н} A_Н \frac{1}{a_{0Н} + b_{0Н} + 1}\left(1 + \frac{0{,}2\pi\tau_в}{\delta_0 \lambda_Н} \cdot 10^{-8}\right) =$$

$$= 1{,}81 \cdot 65 \cdot \frac{1}{6{,}5 + 5{,}7 + 1}\left(1 + \frac{0{,}2 \cdot \pi \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-8}}{1{,}32 \cdot 2{,}73 \cdot 10^{-8}} \cdot 10^{-8}\right) = 21,$$

$$F_{к.\,В} = b_{к.\,В} A_В \frac{1}{a_{0В} + b_{0В} + 1}\left(1 + \frac{0{,}2\pi \cdot \tau_в}{\delta_0 \lambda_В} \cdot 10^{-8}\right) =$$

$$= 1{,}20 \cdot 55 \frac{1}{0{,}96 + 0{,}19 + 1}\left(1 + \frac{0{,}2\pi \cdot 7{,}8}{1{,}32 \cdot 3{,}42 \cdot 10^{-8}}\right) = 64,$$

где

$$L_{\sigma Н} = \frac{w_{с.\,Н} \lambda_Н A_Н l_0 b'_{щ.\,Н}}{i_{2Н}} = \frac{3 \cdot 2{,}73 \cdot 10^{-8} \cdot 65 \cdot 5 \cdot 1{,}3}{5{,}65} = 0{,}61 \cdot 10^{-5} \text{ Г};$$

$$R_{щ.\,Н} = \frac{\Delta U_{щ.\,Н}}{2I_{щ.\,Н}} = \frac{1{,}5}{2 \cdot 11{,}3} = 0{,}066 \text{ Ом};$$

$$T_Н = \frac{b_{щ.\,Н}}{v_{к.\,Н}} = \frac{0{,}63}{940} = 0{,}67 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$A'_Н = \frac{R_{щ.\,Н} T_Н}{L_{\sigma Н}} = \frac{0{,}066 \cdot 0{,}67 \cdot 10^{-3}}{0{,}61 \cdot 10^{-5}} \approx 7{,}2;$$

$$a_{0Н} = \frac{1{,}7 a'_Н A'_Н}{\Delta U_{щ.\,Н}} = \frac{1{,}7 \cdot 0{,}8 \cdot 7{,}2}{1{,}5} \approx 6{,}5;$$

$$b_{0н} = \frac{1{,}7 b'_{н} A'_{н}}{\Delta U_{щ.\,н}} = \frac{1{,}7 \cdot 0{,}7 \cdot 7{,}2}{1{,}5} = 5{,}7;$$

$$L_{\sigma в} = \frac{w_{с.\,в} \lambda_{в} A_{в} l_{0} b'_{щв}}{i_{2в}} = \frac{48 \cdot 3{,}42 \cdot 10^{-8} \cdot 55 \cdot 5 \cdot 0{,}335}{0{,}2} = 75{,}5 \cdot 10^{-5} \text{ Г};$$

$$R_{щ.\,в} = \frac{\Delta U_{щ.\,в}}{2 \cdot I_{щ.\,в}} = \frac{2{,}4}{2 \cdot 0{,}4} = 3{,}0 \text{ Ом};$$

$$T_{в} = \frac{b_{щ.в}}{v_{к.в}} = \frac{0{,}25}{1450} = 0{,}172 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$A'_{в} = \frac{R_{щ.в} T_{в}}{L_{\sigma в}} = \frac{3{,}0 \cdot 0{,}172 \cdot 10^{-3}}{75{,}5 \cdot 10^{-5}} = 0{,}68;$$

$$a_{0в} = \frac{1{,}7 a'_{в} A'_{в}}{\Delta U_{щ.в}} = \frac{1{,}7 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}68}{2{,}4} = 0{,}96;$$

$$b_{0в} = \frac{1{,}7 b'_{в} A'_{в}}{\Delta U_{щ.в}} = \frac{1{,}7 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}68}{2{,}4} = 0{,}19,$$

при этом:

для щеток марки М-6 $a'_{н} = 0{,}8$ В; $b'_{н} = 0{,}7$ В;

для щеток марки ЭГ-8 $a'_{в} = 2{,}0$ В; $b'_{в} = 0{,}4$ В.

Результирующая м. д. с. якоря преобразователя будет

$$F_R = F_q - (F_{\beta н} - F_{\beta в}) - (F_{к.н} - F_{к.в}) =$$
$$= 12 - (2 - 2) - (21 - 64) = 55.$$

46. Полная м. д. с. возбуждения преобразователя при нагрузке на пару полюсов.

Э. д. с. якоря

$$E'_{н} = U_{н} - \Delta U_{2н} - \Delta U_{щ.\,н} = 24 - 1{,}4 - 1{,}5 = 21{,}1 \text{ В},$$

тогда согласно характеристике холостого хода (рис. 1.15) получается

$$F_{в} = F'_{р} + F_R = 570 + 55 = 625.$$

Расчет обмотки возбуждения преобразователя

47. Сечение и диаметр провода обмотки параллельного возбуждения

$$q_{ш} = 1{,}22 \frac{p F_{в} l_{ср1}}{5700 U_{н}} = 1{,}22 \frac{1 \cdot 625 \cdot 18}{5700 \cdot 24} = 0{,}10 \text{ мм}^2,$$

где $l_{ср1} \approx 2(b_{п} + l_{п} + 2\delta_{к}) = 2(1{,}6 + 5{,}0 + 2 \cdot 1{,}2) \approx 18$ см;
при этом предварительно принято $\delta_{к} = 1{,}2$ см.

По ГОСТ 7262—54 из приложения 1 окончательно принимаем:

$$q_{ш} = 0{,}113 \text{ мм}^2; \quad d_{ш}/d_{ш.\,н} = 0{,}38/0{,}44 \text{ мм},$$

провод марки ПЭВ-2.

48. Плотность тока в обмотке возбуждения

$$j_{ш} = \frac{I_{ш}}{q_{ш}} = \frac{0{,}8}{0{,}113} = 7{,}1 \text{ А/мм}^2;$$

при этом окончательно принято $I_{ш} = 0{,}8$ А.

49. Число витков обмотки возбуждения на полюс

$$W_{ш} = \frac{F_{в}}{2I_{ш}} = \frac{625}{2\cdot 0{,}8} = 390.$$

50. Потребная площадь окна для размещения обмотки возбуждения на полюсе

$$Q'_{ш} = \frac{W_{ш}d^2_{ш.и}}{f'_0} = \frac{390\cdot 0{,}44^2}{0{,}82} \approx 92 \text{ мм}^2,$$

где принято $f'_0 = 0{,}82$.

51. Фактическая площадь окна для размещения обмотки возбуждения

$$Q_{ш} = (1{,}1 \div 1{,}2)\, Q'_{ш} = 1{,}2\cdot 92 = 110 \text{ мм}^2,$$

т. е. примерно

$$h'\delta_{к} = 9{,}0\cdot 12 \text{ мм}^2.$$

Число витков в одном слое катушки по высоте сердечника полюса

$$m' = \frac{h' - 2\delta_{и}}{d_{ш.з}} = \frac{9 - 2\cdot 0{,}5}{0{,}44} = 18.$$

Число слоев в катушке

$$m'' = \frac{W_{ш}}{m'} = \frac{390}{18} \approx 22.$$

Окончательная толщина катушки

$$\delta_{к} = m''d_{ш.и} = 22\cdot 0{,}44 \approx 10 \text{ мм}.$$

Окончательная высота сердечника полюса будет

$$h_{п} = h' + 5 \text{ мм} = 9 + 5 = 14 \text{ мм}.$$

52. Сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии при 75° С

$$r_{ш} = 1{,}22\frac{2pW_{ш}l_{срi}}{5700\,q_{ш}} = 1{,}22\,\frac{2\cdot 390\cdot 18}{5700\cdot 0{,}113} \approx 27 \text{ Ом}$$

и ток возбуждения

$$I_{ш} = \frac{U_{Н}}{r_{ш}} = \frac{24}{27} = 0{,}89 \text{ А}.$$

Потери и к. п. д. преобразователя

53. Потери в обмотках якоря и возбуждения:

$$P_{м2Н} = I_{2Н}^2 r_{2Н} = 11{,}3^2 \cdot 0{,}125 \approx 16{,}0 \text{ Вт};$$

$$P_{м2В} = I_{2В}^2 r_{2В} = 0{,}4^2 \cdot 100 = 16{,}0 \text{ Вт};$$

$$P_{м.\,ш} = I_{ш}^2 r_{ш} = 0{,}89^2 \cdot 27 = 21{,}3 \text{ Вт}.$$

54. Переходные потери в контактах щеток и коллектора:

$$P_{к.\,щ.\,Н} = I_{2Н} \Delta U_{щ.\,Н} = 11{,}3 \cdot 1{,}5 = 17{,}0 \text{ Вт};$$

$$P_{к.\,щ.\,В} = I_{2В} \Delta U_{щ.\,В} = 0{,}4 \cdot 2{,}4 = 0{,}96 \text{ Вт}.$$

55. Потери на гистерезис и вихревые токи в стали якоря. Масса (вес) стали:

$$G_{c2} = 5{,}5\,(D_{н2} - 2h_{п2})^2 l_0 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 5{,}5\,(4{,}95 - 2 \cdot 1{,}3)^2 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-3} = 0{,}152 \text{ кг};$$

$$G_{з2} = 7{,}8\, z_2 b''_{з2} h_{п2} l_0 \cdot 10^{-3} = 7{,}8 \cdot 15 \cdot 0{,}25 \cdot 1{,}3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0{,}19 \text{ кг}.$$

Потери:

$$P_{c2} = p_{c2} B'^2_{c2} G_{c2} = 30{,}1 \cdot 1{,}51^2 \cdot 0{,}152 = 10{,}4 \text{ Вт};$$

$$P_{з2} = p_{з2} B'^2_{з2} G_{з2} = 31{,}6 \cdot 1{,}68^2 \cdot 0{,}19 = 17{,}0 \text{ Вт},$$

где

$$p_{c2} = 2\varepsilon \left(\frac{f_2}{100}\right) + 2{,}5\,\rho \left(\frac{f_2}{100}\right)^2 = 2 \cdot 4{,}1 \left(\frac{125}{100}\right) +$$

$$+ 2{,}5 \cdot 5{,}1 \left(\frac{125}{100}\right)^2 = 30{,}1 \text{ Вт/кг};$$

$$p_{з2} = 1{,}5\varepsilon \left(\frac{f_2}{100}\right) + 3\rho \left(\frac{f_2}{100}\right)^2 = 1{,}5 \cdot 4{,}1 \left(\frac{125}{100}\right) +$$

$$+ 3 \cdot 5{,}1 \left(\frac{125}{100}\right)^2 = 31{,}6 \text{ Вт/кг};$$

$$B'_{c2} = B_{c2} \frac{E'_{н}}{E_{н}} = 1{,}41\, \frac{21{,}1}{19{,}6} = 1{,}51 \text{ Т};$$

$$B'_{з2} = B_{з2} \frac{E'_{н}}{E_{н}} = 1{,}56\, \frac{21{,}1}{19{,}6} = 1{,}68 \text{ Т};$$

$$\sum P_{c} = P_{c2} + P_{з2} = 10{,}4 + 17{,}4 = 27{,}8 \text{ Вт}.$$

56. Механические потери в преобразователе:

$$P_{т.\,щ.\,Н} = \mu_{Н} p_{щ.\,Н} S'_{щ.\,Н} v_{к.\,Н} =$$

$$= 0{,}2 \cdot 1{,}96 \cdot 2 \cdot 0{,}63 \cdot 9{,}4 = 4{,}65 \text{ Вт};$$

$$P_{т.щ.В} = \mu_В p_{щ.В} S'_{щ.В} v_{к.В} =$$

$$= 0{,}25 \cdot 2{,}45 \cdot 2 \cdot 0{,}08 \cdot 14{,}5 = 1{,}42 \text{ Вт};$$

$$P_{т.п} = k_m G_a n \cdot 10^{-3} = 1{,}1 \cdot 0{,}97 \cdot 7500 \cdot 10^{-3} = 8{,}0 \text{ Вт},$$

где принято $k_m = 1{,}1$;

$$G_a = \frac{\pi}{4}\left(D_{н2}^2 l_0 + D_{к.Н}^2 l_{к.Н} + D_{к.В}^2 l_{к.В}\right)\gamma_a \cdot 10^{-3} =$$

$$= \frac{\pi}{4}(4{,}95^2 \cdot 5{,}0 + 2{,}4^2 \cdot 1{,}8 + 3{,}7^2 \cdot 0{,}8)\,8{,}5 \cdot 10^{-3} \approx 0{,}97 \text{ кг};$$

$$P_{т.в} = 2D_{н2}^3 n^3 l_0 \cdot 10^{-14} = 2 \cdot 4{,}95^3 \cdot 7500^3 \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-14} = 5{,}0 \text{ Вт};$$

$$P_{мх} = P_{т.щН} + P_{т.щВ} + P_{т.п} + P_{т.в} =$$

$$= 4{,}65 + 1{,}42 + 8{,}0 + 5{,}0 = 19{,}1 \text{ Вт}.$$

57. Общие потери в преобразователе

$$\Sigma P = \zeta_0 (P_{м2Н} + P_{м2В} + P_{м.ш} + P_{к.щ.Н} + P_{к.щ.В} + \Sigma P_c + P_{мх}) =$$

$$= 1{,}08(16{,}0 + 16{,}0 + 21{,}3 + 17{,}0 + 0{,}96 + 27{,}4 + 19{,}1) = 128 \text{ Вт}.$$

58. Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке преобразователя

$$\eta = \frac{P_В}{P_В + \Sigma P} \cdot 100 = \frac{180}{180 + 128} \cdot 100 = 58{,}5\%$$

и потребляемый им ток от источника низшего напряжения

$$I_Н = \frac{P_В + \Sigma P}{U_Н} = \frac{180 + 128}{24} = 12{,}8 \text{ А}.$$

Упрощенный тепловой расчет преобразователя

59. Превышение температуры якоря преобразователя.

а. Полные потери в активном слое якоря

$$P'_{м2} = (P_{м2Н} + P_{м2В})\frac{l_0}{l_{ср2}} + \Sigma P_c = (16{,}0 + 16{,}0)\frac{5{,}0}{11} +$$

$$+ 27{,}4 = 41{,}9 \text{ Вт}.$$

б. Поверхность охлаждения активного слоя якоря

$$S_a \approx \pi D_{н2} l_0 = \pi \cdot 4{,}95 \cdot 5{,}0 = 78 \text{ см}^2.$$

в. Среднее превышение температуры якоря над окружающей средой

$$\Delta\vartheta_2 = \frac{P'_{м2}}{\alpha'(1 + 0{,}1 v_2) S_a} = \frac{41{,}9}{0{,}0024 \cdot (1 + 0{,}1 \cdot 19{,}4) \cdot 78} \approx 76^\circ \text{C}.$$

60. Превышение температуры коллекторов преобразователя.

а. Полные потери на коллекторах:

$$P_{к.\,н} = P_{к.\,щ.\,н} + P_{т.\,щ.\,н} = 17{,}0 + 4{,}65 = 21{,}6 \text{ Вт};$$

$$P_{к.\,в} = P_{к.\,щ.\,в} + P_{т.\,щ.\,в} = 0{,}96 + 1{,}42 = 2{,}4 \text{ Вт}.$$

б. Поверхности охлаждения коллекторов:

$$S_{к.\,н} = \pi D_{к.\,н} l_{к.\,н} = \pi \cdot 2{,}4 \cdot 2{,}0 = 15{,}1 \text{ см}^2;$$

$$S_{к.\,в} = \pi D_{к.\,в} l_{к.\,в} = \pi \cdot 3{,}7 \cdot 0{,}8 = 9{,}3 \text{ см}^2.$$

в. Средние превышения температуры коллекторов над окружающей средой:

$$\Delta\vartheta_{к.\,н} = \frac{P_{к.\,н}}{\alpha_к (1 + 0{,}1\, v_{к.\,н}) S_{к.\,н}} = \frac{21{,}6}{0{,}008(1 + 0{,}1 \cdot 9{,}4)15{,}1} \approx 92^\circ \text{C};$$

$$\Delta\vartheta_{к.\,в} = \frac{P_{к.\,в}}{\alpha_к (1 + 0{,}1\, v_{к.\,в}) S_{к.\,в}} = \frac{2{,}4}{0{,}006(1 + 0{,}1 \cdot 14{,}5) \cdot 9{,}3} \approx 18^\circ \text{C}.$$

61. Превышение температуры обмотки возбуждения преобразователя.

а. Потери в одной катушке обмотки возбуждения

$$w_{м.\,ш} = \frac{P_{м.\,ш}}{2p} = \frac{21{,}3}{2} \approx 10{,}7 \text{ Вт}.$$

б. Поверхность охлаждения одной катушки обмотки возбуждения

$$S_0 \approx 2(b_п + l_п + 4\delta_к) h_к + 2(b_п + 2\delta_к)\delta_к =$$
$$= 2(1{,}6 + 5{,}0 + 4 \cdot 1{,}0)\,0{,}8 + 2(1{,}6 + 2 \cdot 1{,}0)\,1{,}0 \approx 24{,}0 \text{ см}^2.$$

в. Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над окружающей средой

$$\Delta\vartheta_ш = \frac{w_{м.\,ш}}{\alpha_0' S_0} = \frac{10{,}7}{0{,}0044 \cdot 24} = 100^\circ \text{C}.$$

Упрощенный тепловой расчет машины дает только весьма приблизительную оценку теплового режима работы, так как он оперирует весьма ориентировочными значениями коэффициентов теплоотдачи соответствующих ее поверхностей.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

РАСЧЕТ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Универсальные коллекторные электродвигатели мощностью от нескольких единиц до сотен ватт имеют разнообразное применение. Они широко используются, например, в телеграфных аппаратах, в устройствах автоматики и телемеханики, в часовой промышленности и т. д. Эти же двигатели с одной обмоткой возбуждения на полюсах находят большое применение и в установках домашнего быта, как-то: в вентиляторах, швейных и полотерных машинах, пылесосах, мясорубках и др.

Универсальные коллекторные электродвигатели в принципе представляют собой двигатели последовательного возбуждения, работающие как от сети постоянного, так и сети переменного тока при одинаковой скорости вращения в режиме полной нагрузки. Они развивают относительно высокий вращающий момент и имеют ограниченные размеры и массу вследствие их быстроходности.

При очень малых мощностях эти двигатели иногда строятся на весьма большие скорости вращения. Так, например, в часовой промышленности для привода мелкого шлифовального инструмента встречаются универсальные коллекторные электродвигатели мощностью около 1 Вт при 30 000 — 40 000 об/мин.

Универсальный коллекторный электродвигатель малой мощности имеет шихтованную магнитную систему, собираемую из листовой электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм, (рис. 1.13, *б*), и две обмотки возбуждения на полюсах (рис. 7.1). Одна обмотка, с меньшим числом витков и зажимами «0» и «∼», предназначена для работы двигателя от сети переменного тока, а другая включается дополнительно последовательно с первой при работе его от сети постоянного тока; зажимы двигателя в этом случае обозначены «0» и «=».

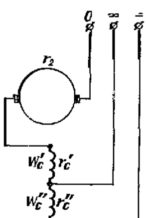


Рис. 7.1. Схема универсального коллекторного двигателя

Увеличение числа витков обмотки возбуждения при работе двигателя от сети постоянного тока вызывается необходимостью обеспечения при номинальной мощности той же скорости вращения, что и при работе от сети переменного тока. В самом деле, скорость вращения двигателя при определенном магнитном поле в воздушном зазоре характеризуется электродвижущей силой вращения. Эта э. д. с. при работе двигателя от сети переменного тока вследствие наличия в нем индуктивных э. д. с. меньше, чем при работе от сети постоянного тока, поэтому в последнем случае скорость вращения двигателя при том же поле была бы выше.

Для понижения этой скорости при работе двигателя от сети постоянного тока до требуемой величины приходится усиливать поле полюсов посредством включения дополнительной обмотки возбуждения.

7-1. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Основой для расчета универсальных коллекторных электродвигателей малой мощности являются следующие данные:

полезная мощность P_2, Вт;

напряжения питающих сетей $U_{пс}$ и $U_{пр}$, В;

частота сети f_1, Гц;

скорость вращения n, об/мин;

режим работы продолжительный, кратковременный;
исполнение двигателя закрытое, защищенное.

Универсальные коллекторные электродвигатели строятся обычно закрытого исполнения на напряжения сети переменного тока 127 и 220 В и сети постоянного тока 110 и 220 В.

7-2. ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Определение диаметра и длины якоря универсального коллекторного двигателя, как и в случае проектирования других машин, является также важнейшим этапом его расчета. Этот якорь имеет аналогичное устройство и технологию изготовления, как и вышерассмотренные машины постоянного тока.

1. Расчетная мощность электродвигателя

Если приближенно положить, что потери в обмотках и контактах щеток малых универсальных коллекторных двигателей для продолжительного режима работы при питании их от сети переменного тока составляют в среднем около одной трети общих потерь, то расчетную мощность таких двигателей, как и рассмотренных

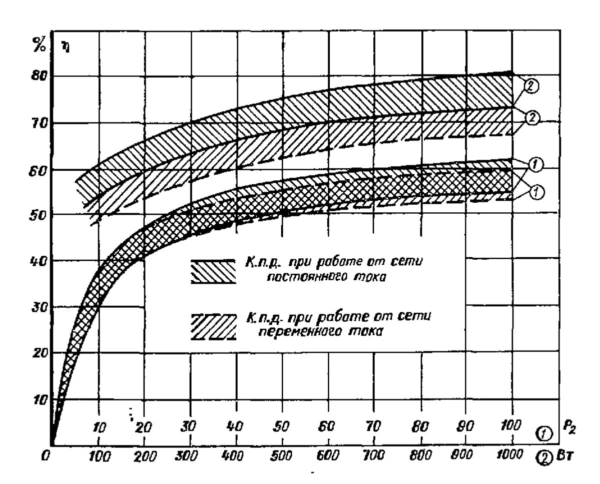


Рис. 7.2. Кривые к. п. д. универсальных коллекторных двигателей в зависимости от полезной мощности на валу

выше двигателей постоянного тока, можно определить по следующей формуле:

$$P_a = EI_2 - \frac{2+\eta}{3\eta} P_2 \text{ Вт},$$

где P_2 — номинальная мощность электродвигателя по заданию, Вт; η — к. п. д. двигателя, выбираемый по кривым рис. 7.2.

2. Ток и э. д. с. якоря при нагрузке

Величины тока и э. д. с. якоря при нагрузке универсальных коллекторных электродвигателей предварительно определяются по следующим формулам:

$$I_2 = \frac{P_2}{\eta U_{пр} \cos\varphi}, \text{ А};$$

$$E = \frac{P_a}{I_2} = \frac{2+\eta}{3} U_{пр} \cos\varphi, \text{ В},$$

где $U_{пр}$ — номинальное напряжение двигателя по заданию; η — берется из позиции 1; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности универсального коллекторного двигателя при номинальной нагрузке, предварительно выбираемой по кривым рис. 7.3 в зависимости от коэффициента трансформации k между обмотками возбуждения и якоря k, числа полюсов $2p$ и отношения f_1/f_2; здесь f_1 — частота сети переменного тока; $f_2 = pn/60$ — частота перемагничивания стали якоря; n — скорость вращения якоря по заданию.

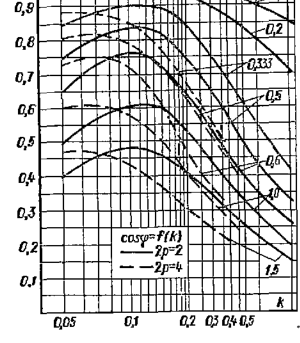


Рис. 7.3. Кривые $\cos\varphi = f(k)$ универсального коллекторного двигателя

Универсальные коллекторные электродвигатели мощностью до 150—200 Вт обычно выполняются двухполюсными и свыше этих мощностей — четырехполюсными.

Коэффициент мощности двигателя $\cos\varphi$, как показывают кривые рис. 7.3, имеет оптимальные значения при коэффициентах трансформации порядка 0,10 — 0,15 в случае $2p = 2$ и порядка 0,05 — 0,075 в случае $2p = 4$; поэтому для получения высокого $\cos\varphi$ целесообразно выбирать значение коэффициента трансформации k в пределах:

0,10 — 0,25 — для $2p = 2$;

0,05 — 0,10 — для $2p = 4$.

3. Машинная постоянная

Для коллекторных машин переменного тока эта постоянная определяется следующей формулой:

$$C=\frac{6\sqrt{2}\cdot 10^4}{\alpha B_\delta A_2}=\frac{D_{н2}^2 l_0 n}{P_a},$$

где B_δ — амплитудное значение индукции в воздушном зазоре под полюсом при работе двигателя от сети переменного тока, выбираемое по кривым рис. 1.2; A_2 — линейная нагрузка якоря, выбираемая по кривым рис. 1.2; $\alpha = 0{,}60 \div 0{,}70$.

4. Диаметр и расчетная длина якоря

В универсальных коллекторных электродвигателях отношение длины пакета якоря l_0 к его диаметру или внутреннему диаметру полюсов $D_{п1}$ обычно находится в пределах:

$$\xi = l_0/D_{п1}=0{,}4 \div 1{,}6.$$

Внутренний диаметр полюсов и расчетная длина пакета якоря будут:

$$D_{п1}=\sqrt[3]{\frac{CP_a}{\xi n}}, \text{ см}; \quad l_0=\xi Д_{п1}, \text{ см},$$

где n берется по заданию; P_a — из позиции 1; C — из позиции 3.

Расчетные значения внутреннего диаметра полюсов $D_{п1}$ и длины пакета якоря l_0 обычно округляются до ближайших стандартных чисел согласно ГОСТ 6636—69 (приложение VIII); при этом окончательный диаметр якоря $D_{н2} = D_{п1} - 2\delta$, где δ — длина воздушного зазора между полюсами и якорем согласно § 7-4.

5. Окружная скорость якоря

$$v_2=\frac{\pi D_{н2} n}{60}\cdot 10^{-2}, \text{ м/с},$$

где n берется по заданию; $D_{н2}$ — из позиции 4.

6. Полюсный шаг и расчетная полюсная дуга

$$\tau_2=\frac{\pi D_{н2}}{2p}; \quad b_0=\alpha\tau_2, \text{ см},$$

где $2p$ берется из позиции 2; α — из позиции 3; $D_{н2}$ — из позиции 4.

7. Частота перемагничивания стали якоря

$$f_2=\frac{pn}{60}, \text{ Гц}.$$

8. Обмотка якоря

В универсальных коллекторных двигателях при двухполюсном исполнении применяется простая петлевая обмотка, а при четырехполюсном — простая волновая обмотка якоря.

Расчет этой обмотки производится, так же как и для машин постоянного тока, по формулам позиций 8—15 гл. 1 со следующим видоизменением некоторых позиций.

Число проводников обмотки якоря по позиции 9 гл. 1 в универсальных коллекторных двигателях определяется по формуле

$$N_2 = \frac{60a\sqrt{2}E}{pn\Phi_\delta},$$

где $a = 1$; n берется по заданию; E и p — из позиции 2; Φ_δ — из позиции 8 гл. 1.

Число коллекторных пластин по позиции 11 гл. 1 в универсальных двигателях в целях ограничения величины трансформаторной э. д. с. в коммутирующих секциях обмотки якоря не должно быть менее определенного значения.

В малых электродвигателях трансформаторная э. д. с. e_t в этих секциях по условиям благоприятной коммутации должна составлять $e_t \leqslant 6 \div 8$ В при этом верхний предел относится к меньшим мощностям.

Наименьшее число коллекторных пластин здесь определяется из условия

$$K = \pi \left(\frac{f_1}{f_2}\right) \frac{E}{e_t}$$

с округлением до ближайшего целого числа, кратного числу пазов якоря.

В универсальных коллекторных двигателях обычно принимается

$$K = (2 \div 3) z_2;$$

здесь f_1 берется по заданию; E — из позиции 2; f_2 — из позиции 7 данной главы и z_2 согласно позиции 10 гл. 1.

Остальные позиции (8, 10, 12—15 гл. 1) для расчета обмотки якоря универсальных электродвигателей применяются без изменения; в них значения отдельных величин берутся: B_δ — из позиции 3; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4 и b_0 — из позиции 6 гл. 7.

9. Размеры зубцов, пазов и проводов обмотки якоря

Все изложенное в § 1-4 гл. 1 относительно размеров пазов и проводов обмотки якоря для машин постоянного тока может быть отнесено и к универсальным коллекторным двигателям, поэтому расчет их для данных двигателей производится, так же как и для

упомянутых машин, по формулам позиций 16—24 гл. 1, в которых значения отдельных величин берутся: $2p$ и I_2 — из позиции 2; B_δ — из позиции 3; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4 гл. 7; остальные величины берутся из соответствующих последующих позиций той же главы.

10. Коллектор, щеткодержатели и щетки

Конструктивное оформление коллектора и щеточного аппарата и расчет их для универсальных коллекторных двигателей производится, так же как и для машин постоянного тока, по формулам позиций 25—32 гл. 1, в которых значения отдельных величин берутся: I_2 — из позиции 2; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4 и v_2 — из позиции 5 гл. 7; остальные величины берутся из соответствующих последующих позиций настоящей главы.

Следует заметить, что в универсальных электродвигателях ширина щетки по окружности коллектора, по позиции 29 гл. 1; обычно принимается

$$b_{щ} = (1 \div 1{,}5)\, \beta_к, \text{ см.}$$

Кроме того, при проверке коммутации машины по позиции 32 гл. 1 в универсальных двигателях следует проверить также, кроме реактивной э. д. с. $e_р$ и э. д. с. от поля якоря e_a в коммутирующей секции, еще и величину трансформаторной э. д. с. e_t, индуктирующейся в ней вследствие пульсации главного поля полюсов при работе двигателя от сети переменного тока.

Трансформаторная э. д. с. одной секции обмотки якоря определяется по следующей известной формуле:

$$e_t = 4{,}44 f_1 w'_{c2} \Phi_\delta, \text{ В},$$

где f_1 берется по заданию; Φ_δ и w'_{c2} — из соответствующих позиций.

Для получения благоприятной коммутации универсального коллекторного двигателя малой мощности необходимо, чтобы значение e_t не превосходило 6—8 В.

7-4. МАГНИТНАЯ СИСТЕМА ДВИГАТЕЛЯ

Магнитная система универсальных коллекторных двигателей выполняется в виде шихтованной станины вместе с полюсами (рис. 1.13, *б*).

Расчет этой системы производится, так же как и в рассмотренных выше машинах постоянного тока, по формулам позиций 33—46 гл. 1 со следующими видоизменениями некоторых позиций.

Длина воздушного зазора под полюсом по позиции 33 гл. 1 для универсальных коллекторных двигателей определяется по следующей формуле:

$$\delta \approx 0{,}4 \frac{\tau_2 A_2}{B_\delta} \cdot 10^{-4}, \text{ см},$$

где B_δ берется из позиции 3; τ_2 — из позиции 6 и A_2 — из соответствующей позиции гл. 7.

Для универсальных электродвигателей при расчете магнитной системы отпадает позиция 43 гл. 1.

Остальные позиции (34—46, гл. 1) для расчета магнитной системы этого двигателя применяются без изменения; в них значения отдельных величин берутся: I_2 — из позиции 2; B_δ — из позиции 3; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4 и b_0 — из позиции 6 гл. 7.

7-5. ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Как указывалось выше, на полюсах универсального коллекторного электродвигателя имеются две последовательные обмотки возбуждения. Одна предназначена для работы двигателя от сети переменного тока, а другая включается дополнительно последовательно с первой при работе его от сети постоянного тока. Ниже дается расчет этих обмоток возбуждения.

Расчет обмотки возбуждения переменного тока

11. Число витков обмотки, приходящихся на один полюс

Число витков обмотки на полюс W'_c определяется по числу проводов обмотки якоря с помощью коэффициента трансформации k, принятого при предварительном выборе cos φ двигателя:

$$W'_c = \frac{N_2}{2a} k,$$

где $a = 1$; k берется из позиции 2; N_2 — из позиции 8 данной главы.

12. Сечение и диаметр провода обмотки возбуждения

Предварительно сечение провода

$$q'_c = \frac{I_2}{j'_c}, \text{ мм}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2; j'_c — по кривым рис. 1.16, в зависимости от вращающего момента и режима работы двигателя.

По ГОСТ (приложение I) окончательно выбираются ближайшие сечение и диаметр провода:

$$q'_c = \ldots; \ d'_c/d'_{с.и} = \ldots$$

13. Окончательная плотность тока в обмотке возбуждения

$$j'_c = \frac{I_2}{q'_c}, \text{ А/мм}^2,$$

где I_2 берется из позиции 2; q'_c — из позиции 12 данной главы.

14. Сопротивление обмотки возбуждения в нагретом состоянии при 75° С

$$r'_c = 1,22\frac{2pW'_c l'_{ср1}}{5700q'_c}, \text{ Ом},$$

где W'_c берется из позиции 11; q'_c — из позиции 12; $l'_{ср1}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения, см, определяемая по эскизу расположения обмотки на полюсе (при ее определении следует учесть замечания в позиции 50 гл. 1); 1,22 — коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления обмотки при нагревании от 20 до 75° С.

15. Активное падение напряжения в обмотке возбуждения

$$\Delta U'_c = I_2 r'_c, \text{ В},$$

где I_2 берется из позиции 2; r'_c — из позиции 14 данной главы.

16. Требуемая площадь окна для размещения обмотки возбуждения на полюсе

$$Q'_c = \frac{W'_c d'^2_{с.и}}{f'_0}, \text{ мм}^2,$$

где $f'_0 = 0,82 \div 0,88$ — коэффициент, учитывающий возможные неточности намотки рядов проволоки в катушке; W'_c берется из позиции 11; $d'_{с.и}$ — из позиции 12 данной главы

17. Фактическая площадь окна с учетом места для дополнительной обмотки постоянного тока

$$Q_c = (1,3 \div 1,6)\,Q'_c, \text{ мм}^2,$$

где Q'_c — берется из позиции 16 данной главы.

На основании этих данных производится размещение обмоток на полюсах и уточнение высоты сердечника полюса.

18. Проверка величины воздушного зазора под полюсом

М. д. с. обмотки возбуждения на пару полюсов при нагрузке двигателя

$$F'_c = 2\sqrt{2}W'_c I_2,$$

где I_2 берется из позиции 2, W'_c — из позиции 11 данной главы.

В позиции 46 гл. 1 при расчете магнитной системы двигателя получена м. д. с. возбуждения при нагрузке $F_в$. Если эта м. д. с. не равна м. д. с. F'_c, следует несколько изменить величину воздушного зазора и соответственно коэффициент зубчатости в позиции 38 так, чтобы сумма м. д. с. в позиции 46 была равна F'_c.

Далее необходимо проверить величину коэффициента мощности двигателя при нагрузке, который фактически получится при установленных расчетом размерах машины и числе витков обмоток якоря и возбуждения.

На рис. 7.4 представлена диаграмма э. д. с. универсального коллекторного двигателя при работе его от сети переменного тока. В диаграмме угол между приложенным к зажимам двигателя напряжением $\dot{U}_{пр}$ и током $\dot{I}_2$ определяет $\cos\varphi$ двигателя при нагрузке; $-\dot{E}_{ct}$ и $-\dot{E}_{qt}$ являются составляющими напряжения, уравновешивающими соответственно э. д. с. самоиндукции в обмотке возбуждения от пульсации главного поля полюсов и э. д. с. самоиндукции в обмотке якоря от пульсации поперечного поля якоря; $-\dot{E}$ — является составляющей напряжения, уравновешивающей э. д. с. вращения якоря, и, наконец, $\dot{I}_2(r_2 + r_c' + r_щ)$ и $+j\dot{I}_2(x_{\sigma 2} + x_{\sigma c})$ — активное и индуктивное от полей рассеяния падения напряжения в обмотках якоря и возбуждения.

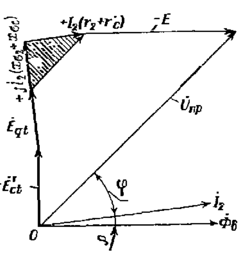


Рис. 7.4. Диаграмма э. д. с. универсального коллекторного двигателя

Угол ρ между током $\dot{I}_2$ и полем возбуждения $Ф_б$ вызывается потерями на гистерезис и вихревые токи в стали двигателя и током, возникающим в коммутирующих секциях обмотки якоря под влиянием трансформаторной э. д. с. e_t. Поэтому для определения $\cos\varphi$ двигателя необходимо предварительно вычислить все указанные в диаграмме величины.

19. Активное падение напряжения в двигателе при работе его от сети переменного тока

$$\Delta U_a' = \Delta U_2 + \Delta U_щ + \Delta U_c', \text{ В},$$

где ΔU_2 — берется из позиции 24; $\Delta U_щ$ — из табл. 1.1 позиции 28 гл. 1, согласно принятой марки щеток, $\Delta U_c'$ — из позиции 15 данной главы.

20. Индуктивное падение напряжения от полей рассеяния в двигателе

Индуктивное падение напряжения рассеяния в обмотке якоря при работе его от сети переменного тока определяется по следующей приближенной формуле:

$$I_2 x_{\sigma 2} = \frac{\pi f_1 N_2^2 \lambda_2 l_0}{2a^2 z_2} I_2, \text{ В}.$$

Индуктивное падение напряжения рассеяния в обмотке возбуждения

$$I_2 x_{\sigma c} = 4{,}44 f_1 2p W'_c \gamma_\sigma (\sigma - 1)\,\Phi_\delta,\ \text{В}.$$

Индуктивное падение напряжения рассеяния в двигателе

$$\Delta U'_\sigma = I_2 x_{\sigma 2} + I_2 x_{\sigma c},\ \text{В}.$$

В этих формулах $\gamma_\sigma = 0{,}75 \div 0{,}85$ — коэффициент сцепления поля рассеяния с обмоткой возбуждения; $a = 1$; f_1 берется по заданию; $2p$ и I_2 — из позиции 2; l_0 — из позиции 4; N_2 — из позиции 8, W'_c — из позиции 11 гл. 7; остальные величины — Φ_δ, z_2, λ_2 и σ — определяются согласно соответствующим позициям гл. 1.

21. Э. д. с. самоиндукции в обмотке якоря от пульсации поперечного поля якоря

Эта э. д. с. определяется по следующей приближенной формуле:

$$E_{ql} = 0{,}15\,\frac{f_1 \alpha^3 N_2^2 D_{н2} l_0 \cdot 10^{-8}}{a^2 p^2 k_\delta \delta}\, I_2,\ \text{В},$$

где $a = 1$; f_1 берется по заданию; $2p$ и I_2 — из позиции 2; α — из позиции 3; $D_{н2}$ и l_0 — из позиции 4; N_2 — из позиции 8 гл. 7, δ и k_δ — согласно позиции 38 гл. 1.

22. Э. д. с. самоиндукции в обмотке возбуждения от пульсации главного поля полюса

Э. д. с. от пульсации главного поля определяется по известной формуле:

$$E'_{cl} = 4{,}44 f_1 2p W'_c \Phi_\delta,\ \text{В},$$

где f_1 берется по заданию; $2p$ — из позиции 2; W'_c — из позиции 11 гл. 7, Φ_δ — согласно позиции 8 гл. 1.

23. Коэффициент мощности двигателя

Согласно диаграмме рис. 7.4, активная и индуктивная составляющие приложенного к зажимам двигателя напряжения в вольтах при $\rho = 0$ будут:

активная составляющая напряжения

$$U_a = \Delta U'_a + E;$$

индуктивная составляющая напряжения

$$U_\sigma = \Delta U'_\sigma + E_{ql} + E'_{cl};$$

напряжение на зажимах двигателя

$$U_{пр} = \sqrt{U_a^2 + U_\sigma^2}.$$

Если значение корня получилось не равным напряжению по заданию, следует несколько изменить величину э. д. с. вращения E и пропорционально ей поле Φ_δ так, чтобы получился требуемый результат.

Искомый коэффициент мощности двигателя при нагрузке будет

$$\cos\varphi = U_a/U_{\text{пр}},$$

где E берется из позиции 2; $\Delta U_a'$ — из позиции 19; $\Delta U_\sigma'$ — из позиции 20; E_{qt} — из позиции 21; E_{ct}' — из позиции 22 данной главы.

Расчет дополнительной обмотки возбуждения постоянного тока

При работе универсального коллекторного двигателя от сети постоянного тока коэффициент мощности становится равным единице и потребляемый им ток из сети будет меньше.

24. Ток и э. д. с. якоря при работе двигателя от сети постоянного тока

$$I_2' = \frac{P_2}{\eta' U_{\text{п. с}}}, \text{ А}; \quad E' = \frac{2+\eta'}{3} U_{\text{п. с}}, \text{ В},$$

где P_2 и $U_{\text{п. с}}$ — берутся по заданию; η' — согласно кривой рис. 7.2.

25. Полезное поле полюса в воздушном зазоре при работе двигателя от сети постоянного тока

$$\Phi_\delta' = \frac{60aE'}{pnN_2}, \text{ Вб},$$

где $a = 1$; n берется по заданию; p — из позиции 2; N_2 — из позиции 8; E' — из позиции 24 данной главы.

26. Полная м. д. с. возбуждения постоянного тока, приходящаяся на пару полюсов

Расчет м. д. с. возбуждения F_c' производится по формулам позиций 38—42 и 45—46 гл. 1, в которых индукции каждого участка магнитной системы должны быть изменены в отношении $\dfrac{\Phi_\delta'}{\Phi_\delta}$, например:

$$B_\delta' = B_\delta \frac{\Phi_\delta'}{\Phi_\delta},$$

где B_δ берется из позиции 3; Φ_δ' — из позиции 24 данной главы; Φ_δ — согласно позиции 8 гл. 1.

27. Число витков дополнительной обмотки возбуждения на полюс

Общее число витков обмотки возбуждения, приходящихся на один полюс при работе двигателя от сети постоянного тока,

$$W_c = \frac{F''_c}{2I'_2}.$$

Число витков дополнительной обмотки возбуждения, приходящихся на один полюс,

$$W''_c = W_c - W'_c,$$

где W'_c берется из позиции 11; I'_2 — из позиции 24; F''_c — из позиции 26 данной главы.

28. Сечение и диаметр провода дополнительной обмотки возбуждения

Предварительно

$$q''_c = \frac{I'_2}{j''_c}, \text{ мм}^2,$$

где I'_2 — берется из позиции 24; j''_c — согласно кривым рис. 1.16, в зависимости от вращающего момента и режима работы двигателя.

По ГОСТ (приложение I) окончательно выбираются ближайшие сечение и диаметр провода:

$$q''_c = \ldots ; \; d''_c/d''_{c.\,и} = \ldots$$

29. Окончательная плотность тока в дополнительной обмотке возбуждения

$$j''_c = \frac{I'_2}{q''_c}, \text{ А/мм}^2,$$

где I'_2 берется из позиции 24; q''_c — из позиции 28 данной главы.

30. Сопротивление дополнительной обмотки возбуждения в нагретом состоянии при 75° С

$$r''_c = 1{,}22 \frac{2pW''_c l''_{ср1}}{5700 q''_c}, \text{ Ом},$$

где W''_c берется из позиции 27; q''_c — из позиции 28 данной главы; $l''_{ср1}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения, см, определяемая по эскизу расположения обмотки на полюсе.

31. Падение напряжения в обеих обмотках возбуждения при работе двигателя от сети постоянного тока

$$\Delta U_c = I'_2 (r'_c + r''_c), \text{ В},$$

где r'_c берется из позиции 14; I'_2 — из позиции 24; r''_c — из позиции 30 данной главы.

32. Проверка величины э. д. с. якоря при работе двигателя от сети постоянного тока

$$E' = U_{п.с} - \Delta U_с - \Delta U_щ - \Delta U_2 \frac{I_2'}{I_2}, \text{ В},$$

где $U_{п.с}$ — берется по заданию; I_2 — из позиции 2; I_2' — из позиции 24; $\Delta U_с$ — из позиции 31 данной главы; ΔU_2 — согласно позиции 24; $\Delta U_щ$ — из табл. 1.1 позиции 28 гл. 1.

Полученная здесь величина э. д. с. E' не должна отличаться от предварительного значения позиции 21 более чем на $\pm$ 3%. При большем отклонении ее следует учесть замечания в позиции 52 гл. 1.

33. Потребная площадь окна для размещения дополнительной обмотки возбуждения

$$Q_с'' = \frac{W_с'' d_{с.и}''^2}{f_0'}, \text{ мм}^2,$$

где $f_0' = 0{,}82 \div 0{,}88$; $W_с''$ берется из позиции 27; $d_{с.и}''$ — из позиции 28 данной главы.

7-6. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Потери и к. п. д. универсального коллекторного двигателя рассчитываются, так же как и машин постоянного тока, по формулам позиций 60—65 гл. 1.

При работе универсального двигателя от сети переменного тока полные магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали $\sum P_с$ определяются следующим образом.

34. Масса стали станины, полюсов, сердечника и зубцов якоря

Масса станины

$$G_{с1} \approx 22 (D_{н1} + 2h_п + h_{с1}) h_{с1} l_0 \cdot 10^{-3}; \text{ кг};$$

масса полюсов

$$G_п \approx 2p 7{,}8 Q_п h_п \cdot 10^{-3}, \text{ кг};$$

масса сердечника якоря

$$G_{с2} \approx 5{,}5 (D_{н2} - 2h_{п2})^2 l_0 \cdot 10^{-3}, \text{ кг};$$

масса зубцов якоря

$$G_{з2} \approx 7{,}8 z_2 b_{з2}'' h_{п2} l_0 10^{-3}, \text{ кг}.$$

В этих формулах $D_{н1}$, $D_{н2}$ и l_0 берутся из позиции 4 данной главы; z_2 — согласно позиции 10; $b_{з2}''$ и $h_{п2}$ — из позиции 21; $Q_п$ — из позиции 35; $h_п$ — из позиции 35; $h_{с1}$ — из позиции 36 гл. 1.

35. Магнитные потери на гистерезис и вихревые токи в стали станины, полюсов и якоря двигателя

Потери в стали станины

$$P_{c1} = p_{c1} B_{c1}^2 G_{c1},\ \text{Вт};$$

потери в стали полюсов

$$P_{п} = p_{c1} B_{п}^2 G_{п},\ \text{Вт};$$

потери в стали сердечника якоря

$$P_{c2} = p_{c2} B_{c2}^2 G_{c2},\ \text{Вт};$$

потери в стали зубцов

$$P_{з2} = p_{з2} B_{з2}^2 G_{з2},\ \text{Вт}.$$

Полные магнитные потери в стали двигателя при работе его от сети переменного тока,

$$\sum P_c = P_{c1} + P_{п} + P_{c2} + P_{з2},\ \text{Вт}.$$

В этих формулах G_{c1}, $G_{п}$, G_{c2} и $G_{з2}$ берутся из позиции 34 данной главы; $B_{з2}$ — согласно позиции 39; B_{c2} — из позиции 40; $B_{п}$ — из позиции 41; B_{c1} — по позиции 42 гл. 1.

Удельные потери в стали, Вт/кг

$$p_{c1} = 2\varepsilon\left(\frac{f_1}{100}\right) + 2{,}5\rho\left(\frac{f_1}{100}\right)^2;$$

$$p_{c2} = 2\varepsilon\left(\frac{f_2}{100}\right) + 2{,}5\rho\left(\frac{f_2}{100}\right)^2;$$

$$p_{з2} = 1{,}5\varepsilon\left(\frac{f_2}{100}\right) + 3\rho\left(\frac{f_2}{100}\right)^2,$$

при этом f_1 берется по заданию, f_2 — из позиции 7 данной главы; ε и ρ — из табл. 1.4 гл. 1.

При работе двигателя от сети постоянного тока потери в стали имеют место только в сердечнике и зубцах якоря при другом значении поля.

Потери в обмотках якоря и возбуждения универсального двигателя вычисляются согласно позиции 60 гл. 1 отдельно для работы от сети переменного и сети постоянного тока.

36. К. п. д. универсального коллекторного двигателя

Для универсального коллекторного двигателя вычисляются два коэффициента полезного действия — при работе его от сети переменного и постоянного тока.

К. п. д. этого двигателя будет:

при работе от сети переменного тока

$$\eta = \frac{U_{пр} I_2 \cos\varphi - \Sigma P}{U_{пр} I_2 \cos\varphi} \cdot 100;$$

при работе от сети постоянного тока

$$\eta' = \frac{U_{пс} I'_2 - \Sigma P'}{U_{пс} I'_2} \cdot 100,$$

где $U_{пр}$ и $U_{пс}$ берутся по заданию; I_2 — из позиции 2; $\cos\varphi$ — из позиции 23; I'_2 — из позиции 24 данной главы; $\sum P$ и $\sum P'$ — из позиции 64 гл. 1.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

8-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Все потери энергии в рассмотренных выше коллекторных машинах малой мощности независимо от их вида превращаются в тепло, которое нагревает отдельные части машины и рассеивается с поверхности ее в окружающую среду. По мере повышения температуры машины постепенно возрастает и теплоотдача поверхности ее. При определенном установившемся значении превышения температуры машины над температурой окружающей среды все тепло, возникающее в ней, полностью рассеивается с ее поверхности в эту среду. Температура машины является важнейшим фактором, ограничивающим мощность ее при данных размерах и роде изоляции обмоток.

Как известно, предельная допустимая температура нагрева машины определяется нормами в зависимости от класса изоляции обмоток. В обычных машинах общего применения употребляется изоляция класса Е, которая представляет собой некоторые синтетические органические материалы (изоляция эмаль-проводов; слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей и др.). В этих машинах для данного класса изоляции допускаемый предел превышения температуры по ГОСТ 183—66 составляет 75° С. Однако ввиду того, что срок службы малых электродвигателей и генераторов постоянного тока специального назначения в ряде случаев измеряется только несколькими сотнями часов, то в этих случаях для них специальными нормами устанавливаются более высокие пределы допускаемых превышений температуры.

Так как точный учет всех факторов и условий теплоотдачи с поверхности нагретых частей машин малой мощности в окружающую среду затруднителен, то расчет превышения температуры их над окружающей средой может быть произведен только приближенно.

Удельные потери в обмотке, стали якоря и трения его о воздух на 1 см длины одного паза соответственно выражаются:

$$w_{м2}=\frac{I_2^2 r_2}{z_2 l_{ср2}};\quad w_{с2}=\frac{\Sigma P_с}{z_2 l_0};\quad w_{т.в}=\frac{P_{т.в}}{z_2 l_0},\ Вт/см,$$

где I_2 — ток якоря машины, А; l_0 — длина пакета якоря, см; z_2 — число пазов якоря; $l_{ср2}$ — средняя длина проводника обмотки якоря, см; r_2 — омическое сопротивление обмотки якоря, Ом; $\sum P_с$ — потери в стали якоря, Вт; $P_{т.в}$ — потери на трение якоря о воздух, Вт.

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды $\Delta\vartheta_2$.

Так как все тепло, выделяющееся в обмотке якоря, передается через пазовую изоляцию стали якоря, то суммарные удельные потери якоря $w_{м2}+w_{с2}+w_{т.в}$ практически снимаются воздухом с наружной поверхности его зубцов и весьма мало передаются через вал.

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой окружающей среды при установившемся режиме будет

$$\Delta\vartheta_2=\frac{\left(1+\alpha_a b'_{32}\frac{\beta}{\lambda'\Pi}\right)w_{м2}+w_{с2}+w_{тв}}{\alpha_a b'_{32}},\ ^\circ C,$$

где b'_{32} — ширина вершины зубца якоря, см; $\alpha_a=\alpha'\cdot(1+0{,}1\,v_2)$ — результирующий коэффициент теплоотдачи наружной поверхности якоря. В машинах постоянного тока по опытным данным при нормальном давлении воздуха 0,101 МН/м² (760 мм рт. ст.) этот коэффициент в среднем имеет следующие значения:

при закрытом исполнении

$$\alpha'=0{,}0016\div0{,}0020\ Вт/(см^2\cdot град);$$

при защищенном исполнении с вентилятором

$$\alpha'=\alpha'_{в0}=0{,}0036\div0{,}0044\ Вт/(см^2\cdot град),$$

v_2 — окружная скорость вращения якоря, м/с; λ' — коэффициент теплопроводности междувитковой изоляции проводов в пазу и пазовой изоляции, который в рассматриваемых машинах малой мощности можно в среднем принять равным $0{,}0013\div0{,}0014$ Вт/(см·град); Π — периметр паза, см (рис. 1.10); $\beta=\beta_1+\beta_2$ — общая толщина изоляции от меди до стенки паза, см; β_1 — толщина пазовой изоляции плюс изоляция одной стороны проводника, см; β_2 — эквивалентная междувитковая изоляция проводников в пазу, см; для круглых проводников составляет:

$$\beta_2=\frac{m_a}{4}\frac{d_{2н}}{k_с},$$

при этом $m_п$ — число изолированных проводников в ряду по средней ширине паза; $k_c \approx 1 + 4\left(\frac{d_2}{d_{2и}} - 0,4\right)$; d_2 и $d_{2и}$ — диаметры голого и изолированного проводов обмотки якоря.

В случае двухколлекторной машины расчет удельных потерь в обмотке якоря $w_{м2}$ и превышения температуры его производится для двух обмоток совместно.

В машинах постоянного тока, применяемых в авиации, коэффициент теплоотдачи поверхности якоря α' определяется в зависимости от высоты по уравнениям (1-5) или (1-6) позиции 16 гл. 1.

8-3. ПРЕВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОЛЛЕКТОРА

Полные потери на коллекторе

$$P_к = P_{щ.к} + P_{т.щ}, \text{ Вт}.$$

Поверхность охлаждения коллектора

$$S_к = \pi D_к l_к, \text{ см}^2,$$

где $D_к$ — диаметр коллектора, см; $l_к$ — длина коллектора, см; $P_{щ.к}$ — переходные потери в контактах щеток и коллектора, Вт; $P_{т.щ}$ — потери на трение щеток о коллектор, Вт.

Среднее превышение температуры коллектора над температурой окружающей среды при установившемся режиме

$$\Delta\vartheta_к = \frac{P_к}{\alpha_к (1 + 0,1 v_к) S_к}, \ {}^\circ\text{C},$$

где $v_к$ — окружная скорость коллектора, м/с; коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора $\alpha_к = 0,004 \div 0,008$ Вт/(см^2·град).

В двухколлекторной машине расчет превышения температуры производится для каждого коллектора в отдельности.

8-4. ПРЕВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Потери в одной катушке обмотки возбуждения

$$w_{м.в} = \frac{P_{м.в}}{2p}, \text{ Вт},$$

где $P_{м.в}$ — потери в обмотке возбуждения, Вт.

Поверхности охлаждения одной катушки (рис. 1.13):

$$S_1 \approx 2(b_п + l_п + 4\delta_к) h_к$$

— наружная поверхность по высоте катушки, соприкасающаяся с воздухом, см^2;

$$S_2 \approx 2(b_п + l_п + 2\delta_к)\delta_к + 2l_п\delta_к$$

— поверхность соприкосновения катушки с внутренней поверхностью станины и полюсного наконечника, см^2;

$$S_3 \approx 2(b_п + 2\delta_к)\delta_к$$

— наружная поверхность по ширине катушки, соприкасающаяся с воздухом вне полюсного наконечника, см^2;

$$S_4 \approx 2(b_п + l_п)h_к$$

— поверхность соприкосновения катушки с сердечником полюса, см^2;

здесь $b_п$ и $l_п$ — ширина и длина сердечника полюса, см; $\delta_к$ и $h_к$ — ширина и высота катушки в соответствии с ее конструкцией, см.

СРЕДНЕЕ ПРЕВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НАД ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ ПРИ СТАНИНЕ С ОТЪЕМНЫМИ ПОЛЮСАМИ (Рис. 1.13, а)

Так как все тепло, выделяющееся в катушке возбуждения в виде потерь $w_{м.в}$, частью снимается воздухом непосредственно с поверхностей катушки S_1 и S_2, а частью передается через поверхности S_3 и S_4 стали сердечника полюса и станины и затем снимается воздухом с внутренней и наружной поверхностей ее $S_с'$ и $S_с''$ (рис. 1.13, *а*), то среднее превышение температуры обмотки возбуждения над окружающей средой будет

$$\Delta\vartheta_в = \frac{AB}{A+B} w_{м.в},\ ^\circ C,$$

где

$$A = \frac{1}{\alpha_с' S_с' + \alpha_с'' S_с''} + \frac{1}{\lambda_2 \frac{S_2}{\beta_2} + \lambda_4 \frac{S_4}{\beta_4}};$$

$$B = \frac{1}{\frac{\lambda_1 \alpha_0'' S_1}{\lambda_1 + \alpha_0'' \beta_1} + \frac{\lambda_3 \alpha_0'' S_3}{\lambda_3 + \alpha_0'' \beta_3}};$$

при этом коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности катушки и внутренней поверхности станины, Вт/(см^2·град):

при закрытом исполнении машины

$$\alpha_0'' = 0{,}0007 \div 0{,}0008;$$

$$\alpha_с' = 0{,}0004 \div 0{,}0005;$$

при защищенном исполнении машины с вентилятором

$$\alpha_0'' = 0{,}0014 \div 0{,}0016;$$

$$\alpha_с' = 0{,}0008 \div 0{,}0010;$$

$\alpha''_c = 0{,}0008 \div 0{,}0010$ — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности станины; λ_1, λ_2, λ_3, λ_4 — коэффициенты теплопроводности междувитковой и наружной изоляции соответствующей поверхности катушки, которые в среднем могут быть приняты в пределах: $\lambda' = 0{,}0008 \div 0{,}0009$ Вт/(см·град);

$$S'_c = \frac{\pi D_1 l_c}{2p} - S_2; \quad S''_c = \frac{\pi D_{н1} l_c}{2p}$$

— площади внутренней и наружной поверхностей станины, см²; $\beta_1 = \beta_4 = \beta' + \beta'_э$ — общая толщина изоляции от меди до поверхностей катушки возбуждения S_1 и S_4, см; $\beta_2 = \beta_3 = \beta'' + \beta''_э$ — то же до поверхностей S_2 и S_3, см; здесь β' и β'' — толщины изоляции между медью и соответствующей поверхностью катушки возбуждения, соприкасающейся с охлаждающим воздухом или сталью станины, сердечника и наконечника полюса, см;

$$\beta'_э = \frac{m'}{4}\frac{d_{в.н}}{k_c}; \quad \beta''_э = \frac{m''}{4}\frac{d_{в.н}}{k_c}$$

— эквивалентные толщины междувитковой изоляции по ширине и высоте катушки соответственно, см;

$$m' \approx \frac{\delta_к}{d_{в.н}}; \quad m'' \approx \frac{h_к}{d_{в.н}}$$

— число витков в слое по ширине и высоте катушки соответственно; k_c вычисляется согласно § 8-2, l_c — длина станины, см; D_1 и $D_{н1}$ — внутренний и наружный диаметры станины, см.

СРЕДНЕЕ ПРЕВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НАД ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ ПРИ ШИХТОВАННОЙ СТАНИНЕ (Рис 1.13, б)

В этом случае периметр катушки возбуждения больше, чем в рассмотренном случае, и поэтому поверхности ее в соответствии с замечанием в позиции 50 гл. 1, будут определяться следующими приближенными соотношениями, см²:

$$S_1 \approx (b_0 + b_п + 2l_п + 8\delta_к)\,h_к;$$

$$S_2 \approx (b_0 + b_п + 4l_п + 4\delta_к)\,\delta_к;$$

$$S_3 \approx (b_0 + b_п + 4\delta_к)\,\delta_к;$$

$$S_4 \approx (b_0 + b_п + 2l_п)\,h_к;$$

где b_0 — расчетная длина полюсной дуги, см.

Кроме того, вследствие значительной воздушной прослойки между поверхностью сердечника полюса и внутренней поверхностью катушки S_4 из-за неплотного прилегания ее к сердечнику, коэффициент теплопроводности λ_4 от меди к стали сердечника через эту

поверхность будет значительно меньше, чем через другие. Этот коэффициент в среднем можно принять:

$$\lambda_4 = 0{,}0002 \div 0{,}0003 \text{ Вт/(см} \cdot \text{град)}.$$

Величина β_4 должна учитывать также и толщину слоя воздуха между указанными поверхностями сердечника и катушки.

Для универсальных коллекторных электродвигателей расчет превышений температуры якоря, коллектора и обмотки возбуждения над температурой окружающей среды обычно производится при работе его от сети переменного тока, так как в этом случае потери в якоре и на коллекторе больше. При расчете превышения температуры обмотки возбуждения в данном двигателе необходимо учитывать потери в стали станины и полюсов: $w_{c1} = \frac{P_{c1} + P_п}{2p}$, конструкцию катушек возбуждения для случая шихтованной станины и закрытие катушки переменного тока дополнительной катушкой постоянного тока. Так как поверхность S_1 первой катушки закрыта дополнительной катушкой, то теплоотдача ее в этом направлении практически отсутствует, поэтому в коэффициенте B нужно положить $\lambda_1 = 0$.

Тогда превышение температуры обмотки возбуждения переменного тока в универсальном коллекторном электродвигателе будет:

$$\Delta\vartheta_в = \frac{AB}{A+B}\left(w_{м.\,в} + \frac{C_0}{A} w_{c1}\right), \ ^\circ C_1,$$

где

$$C_0 = \frac{1}{\alpha_c' S_c' + \alpha_c'' S_c''};$$

при этом под S_c' и S_c'' понимаются площади внутренней и наружной поверхностей корпуса, определяемые как и выше.

8-5. УПРОЩЕННЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН

В целях сокращения объема вычислительной работы при тепловом расчете малых машин постоянного тока можно в приближенных расчетах ограничиться упрощенным методом теплового расчета. В этом случае средние превышения температур якоря, коллектора и обмотки возбуждения машины над температурой окружающей среды определяются по следующим приближенным формулам.

1. Превышение температуры якоря

Полные потери в активном слое якоря

$$P_{м2}' = P_{м2}\frac{l_0}{l_{ср2}} + \sum P_c, \text{ Вт}.$$

Поверхность охлаждения активного слоя якоря

$$S_{н2} \approx \pi D_{н2} l_0, \text{ см}^2,$$

где $D_{н2}$ и l_0 — диаметр и длина якоря, см; $l_{ср2}$ — средняя длина проводника якоря; см; $P_{м2}$ — потери в обмотке якоря, Вт; $\sum P_c$ — потери в стали якоря, Вт.

Среднее превышение температуры якоря над температурой окружающей среды при установившемся режиме

$$\Delta\vartheta_2 = \frac{P'_{м2}}{\alpha'(1+0,1v_2)\, S_{н2}}, \text{ °C},$$

где при закрытом исполнении машин $\alpha' = 0,0018 \div 0,0026$ Вт/(см^2 $\times$ $\times$ град).

2. Превышение температуры коллектора

В этом случае расчет превышения температуры коллектора машины производится согласно § 8-3.

3. Превышение температуры обмотки возбуждения

Потери в одной катушке обмотки возбуждения

$$w_{м.в} = \frac{P_{м.в}}{2p}, \text{ Вт},$$

где $P_{м.в}$ — потери в обмотке возбуждения, Вт.

Поверхность охлаждения одной катушки обмотки возбуждения:

при станние с отъемными полюсами (рис. 1.13, *а*)

$$S_0 \approx 2(b_п + l_п + 4\delta_к) h_к + 2(b_п + 2\delta_к)\delta_к, \text{ см}^2;$$

при шихтованной станине (рис. 13, *б*)

$$S_0 \approx (b_0 + b_п + 2l_п + 8\delta_к) h_к + (b_0 + b_п + 4\delta_к)\delta_к, \text{ см}^2,$$

где b_0 — длина полюсиой дуги, см; $b_п$ и $l_п$ — ширнна и длина сердечника полюса, см; $\delta_к$ и $h_к$ — ширина и высота катушки в соответствии с ее конструкцией, см.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения иад температурой окружающей среды при установившемся режиме

$$\Delta\vartheta_в = \frac{w_{м.в}}{\alpha''_0 S_0}, \text{ °C},$$

где при закрытом исполиеиии машин $\alpha''_0 = 0,0032 \div 0,0044$ Вт/(см^2 $\times$ $\times$ град).

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Размеры круглых медных обмоточных проводов

по ГОСТ 2773—51, ГОСТ 6324—52, ГОСТ 7262—54, ГОСТ 7019—60, МРТУ 2—43—12—61 и МИО 003 63

Диаметр голого провода, мм	Сечение голого провода, мм²	Диаметр провода с изоляцией, мм				
		ПЭЛ и ПЭТ (ГОСТ 2773—51)	ПЭВ-2 ПЭТВ и ПЭФ-2 (ГОСТ 7262—54, МРТУ2-4313—61 и МИО 003 63)	ПЭЛШО и ПЭЛШКО (ГОСТ 6324—52)	ПБД (ГОСТ 6324—52)	ПЭТКСОТ (ГОСТ 7019—60)
0,05	0,00196	0,065	0,08	0,12	—	—
0,06	0,00283	0,075	0,09	0,13	—	—
0,07	0,00385	0,085	0,10	0,14	—	—
0,08	0,00502	0,095	0,11	0,15	—	—
0,09	0,00686	0,105	0,12	0,16	—	—
0,10	0,00785	0,120	0,13	0,175	—	—
0,11	0,00950	0,130	0,14	0,185	—	—
0,12	0,0113	0,140	0,15	0,195	—	—
0,13	0,0132	0,150	0,16	0,205	—	—
0,14	0,0154	0,160	0,17	0,215	—	—
0,15	0,0176	0,170	0,19	0,225	—	—
0,16	0,0201	0,180	0,20	0,235	—	—
0,17	0,0227	0,190	0,21	0,245	—	—
0,18	0,0254	0,200	0,22	0,255	—	—
0,19	0,0283	0,210	0,23	0,265	—	—
0,20	0,0314	0,225	0,24	0,290	0,39	—
0,21	0,0346	0,235	0,25	0,300	0,40	—
0,23	0,0415	0,255	0,28	0,320	0,42	—
0,25	0,0440	0,275	0,30	0,340	0,44	—
0,27	0,0572	0,305	0,32	0,370	0,49	—
0,29	0,0660	0,325	0,34	0,390	0,51	—
0,31	0,0754	0,350	0,36	0,415	0,53	—
0,33	0,0855	0,370	0,38	0,435	0,55	0,47
0,35	0,0962	0,390	0,41	0,455	0,57	0,49
0,38	0,113	0,420	0,44	0,490	0,60	0,52
0,41	0,132	0,450	0,47	0,520	0,63	0,55
0,44	0,152	0,485	0,50	0,550	0,66	0,58
0,47	0,173	0,515	0,53	0,580	0,69	0,61
0,49	0,188	0,535	0,55	0,600	0,71	0,63
0,51	0,204	0,560	0,58	0,625	0,73	0,65
0,53	0,220	0,580	0,60	0,645	0,75	0,67
0,55	0,237	0,600	0,62	0,665	0,77	0,69

Диаметр голого провода, мм	Сечение голого провода, мм²	Диаметр провода с изоляцией, мм				
		ПЭЛ и ПЭТ (ГОСТ 2773—51)	ПЭВ-2 ПЭТВ и ПЭФ-2 (ГОСТ 7262—54, МРТУ2-4313—61 и МИО 003—63)	ПЭЛШО и ПЭЛШКО (ГОСТ 6324—52)	ПБД (ГОСТ 6324—52)	ПЭТКСОТ (ГОСТ 7019—60)
0,57	0,255	0,620	0,64	0,685	0,79	0,71
0,59	0,273	0,640	0,66	0,705	0,81	0,73
0,62	0,301	0,670	0,70	0,735	0,84	0,76
0,64	0,321	0,690	0,72	0,755	0,86	0,78
0,67	0,353	0,720	0,75	0,785	0,89	0,81
0,69	0,374	0,740	0,77	0,805	0,91	0,83
0,72	0,407	0,780	0,30	0,645	0,94	0,87
0,74	0,430	0,800	0,83	0,865	0,96	0,89
0,77	0,466	0,830	0,86	0,895	0,99	0,92
0,80	0,503	0,860	0,89	0,925	1,02	0,95
0,83	0,541	0,890	0,92	0,955	1,05	0,98
0,86	0,581	0,920	0,95	0,985	1,08	1,01
0,90	0,636	0,960	0,99	1,025	1,12	1,06
0,93	0,679	0,990	1,02	1,055	1,15	—
0,96	0,724	1,020	1,05	1,085	1,18	—
1,00	0,785	1,070	1,11	1,135	1,27	—
1,04	0,850	1,115	1,15	1,175	1,31	—
1,08	0,916	1,155	1,19	1,215	1,35	—
1,12	0,985	1,195	1,23	1,255	1,39	—
1,16	1,057	1,235	1,27	1,295	1,43	—
1,20	1,130	1,280	1,31	1,335	1,47	—
1,25	1,210	1,330	1,36	1,385	1,52	—
1,30	1,330	1,380	1,41	1,435	1,57	—
1,35	1,430	1,430	1,46	1,485	1,62	—
1,40	1,540	1,480	1,51	1,535	1,67	—
1,45	1,650	1,530	1,56	1,585	1,72	—
1,50	1,770	1,580	1,61	1,655	1,77	—
1,56	1,91	1,640	1,67	1,715	1,83	—
1,62	2,06	1,700	1,73	1,755	1,89	—
1,68	2,21	1,760	1,79	1,835	1,95	—
1,74	2,37	1,820	1,85	1,895	2,01	—
1,81	2,57	1,890	1,93	1,965	2,08	—
1,86	2,77	1,960	2,00	2,035	2,15	—
1,95	2,99	2,030	2,07	2,105	2,22	—
2,02	3,20	2,100	2,14	2,175	2,29	—
2,10	3,46	2,180	2,23	2,255	2,37	—
2,26	4,02	2,340	2,39	2,415	2,53	—
2,44	4,65	2,520	2,57	2,595	2,71	—

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Лакоткань электроизоляционная по ГОСТ 2214—60

Марки лакоткани

Хлопчатобумажная:

ЛХ1 — нормальная, с повышенными диэлектрическими свойствами.

ЛХ2 — нормальная.

ЛХМ — маслостойкая.

ЛХС — специальная.

Шелковая:

ЛШ1 — нормальная, с повышенными диэлектрическими свойствами
ЛШ2 — нормальная
ЛШС1 — специальная, с повышенными диэлектрическими свойствами
ЛШС2 — специальная
ЛШС — специальная, тонкая

Технические условия: 1. Ширина лакоткани — от 700 до 1000 мм.

2. Среднее пробивное напряжение лакоткани после выдержки в течение 18 ч, при температуре 20 ± 5° С и относительной влажности воздуха 65±5%, марка лакоткани и толщина ее приведены в таблице.

Марка лакоткани	Толщина, *мм*	U, $кв_{эфф}$	Марка лакоткани	Толщина, *мм*	U, $кв_{эфф}$
ЛХ1	0,15 0,17 0,20 0,24	4,2 4,8 5,6 6,7	ЛХМ	0,17 0,20 0,24	5,1 6,1 7,7
ЛХ2	0,15 0,17 0,20 0,24 0,30	3,3 3,7 4,4 5,2 6,6	ЛХС	0,17 0,20	4,7 5,0
ЛШ1	0,10 0,15	5,0 7,5	ЛШС	0,04 0,05 0,06	0,3 1,0 2,0
ЛШ2	0,08 0,10 0,12 0,15	2,7 3,6 4,3 5,4	ЛШС1	0,12	7,6
			ЛШС2	0,12	6,5

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Технические показатели картона электроизоляционного марки ЭВ по ГОСТ 2824—60

Название показателя	Норма
Толщина, *мм*	01; 0,15; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 1; 1,25; 1,5, 1,75; 2; 2,5; 3
Объемная масса (вес) при 10%-ной влажности, г/см³, картона толщиной, мм:	
0,1—0,5	1,15
1—1,5	1,00
1,75—3	0,95

Название показателя	Норма
Пробивная напряженность U, кВ$_{эфф}$/мм картона толщиной, мм:	
0,1—0,3	11
0,4—0,5	10
1—2	8
2,5—3	7,5
Пробивная напряженность после одного перегиба в продольном направлении U, кВ$_{эфф}$/мм картона толщиной, мм	
0,1—0,3	6
0,4—0,5	5

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Сталь электротехническая тонколистовая по ГОСТ 802—58

Марки стали

Листовая электротехническая сталь по степени легирования ее кремнием, магнитным и электрическим свойствам подразделяется на следующие марки:

Э11, Э12, Э13
Э21, Э22
Э31, Э34, Э310, Э320, Э330, Э340, Э370
Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48

Буквы и цифры в марках электротехнической стали условно обозначают:

Э — электротехническая сталь

Первая цифра (1, 2, 3, 4) — степень легирования кремнием: 1 — слаболегированная сталь; 2 — среднелегированная сталь; 3 — повышенно-легированная сталь; 4 — высоколегированная сталь.

Вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) — гарантированные электромагнитные свойства стали:

1, 2, 3,— удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 Гц и магнитная индукция в сильных полях;

4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 Гц и магнитная индукция в средних полях;

5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях — от 0,002 до 0,008 А/см

7, 8 — магнитная проницаемость в средних полях — от 0,03 до 10А/см.

Третья цифра (0) — обозначает, что сталь холоднокатаная.

Толщина и размеры листов стали приведены в табл. 1.

Таблица 1

Марка стали	Толщина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
Э11, Э12, Э21, Э22, Э31, Э32, Э41, Э42, Э43, Э44, Э310, Э320, Э330	0,5	600—1000	1200—2000
Э310, Э320, Э330, Э31, Э32, Э41, Э42, Э43, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48	0,35	240—1000	1500—2000
Э380, Э370, Э340, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48	0,20	240—750	720—1500
Э44	0,10	700	720

Магнитные свойства и удельные потери некоторых марок стали приведены в табл. 2 и 3

Таблица 2

Марка стали	Толщина, мм	Магнитная индукция B не менее, Т, при напряженности магнитного поля H, А/см					Удельные потери p не более, Вт/кг, при отношении индукции к частоте		
		10	25	50	100	300	1,0/50	1,5/50	1,7/50
Э11	0,5	—	1,50	1,62	1,75	1,97	3,30	7,90	—
Э12	0,5	—	1,49	1,61	1,74	1,96	2,80	6,80	—
Э31	0,5	—	1,46	1,57	1,70	1,90	2,00	4,50	—
Э31	0,35	—	1,46	1,57	1,70	1,90	1,60	3,60	—
Э41	0,5	1,30	1,45	1,56	1,68	1,88	1,60	3,60	—
Э41	0,35	1,30	1,45	1,56	1,68	1,88	1,35	3,20	—
Э42	0,5	1,29	1,44	1,55	1,66	1,87	1,40	3,20	—
Э42	0,35	1,29	1,44	1,55	1,66	1,87	1,20	2,80	—
Э310	0,5	1,57	1,70	1,80	1,90	1,98	1,25	2,80	3,80
Э310	0,35	1,57	1,70	1,80	1,90	1,98	1,00	2,20	3,20

Таблица 3

Марка стали	Толщина, мм	Магнитная индукция B не менее, Т, при напряженности магнитного поля H, А/см			Удельные потери p не более, Вт/кг, при отношении индукции к частоте	
		5	10	25	0,75/400	1,0/400
Э340	0,35	1,46	1,57	1,70	12,0	21,0
Э340	0,20	1,40	1,55	1,67	7,0	12,0
Э44	0,35	1,18	1,29	1,43	10,7	19,0
Э44	0,20	1,18	1,28	1,42	7,2	12,5
Э44	0,15	1,16	1,28	1,41	6,8	11,7
Э44	0,10	1,15	1,27	1,40	6,0	10,5

Среднее удельное электрическое сопротивление стали, Ом·мм²/м для марок:

Э11, Э12, Э13 — 0,25;
Э21, Э22 — 0,40;
Э31, Э32, Э310, Э320, Э330, Э340 — 0,50;
Э41, Э42, Э43, Э44 — 0,60.

ПРИЛОЖЕНИЕ V

Материалы магнитнотвердые литые по ГОСТ 17 809—72

Марка сплава	Максимальная энергия $(BH)_{макс}/2$, кДж/м³	Коэрцитивная сила H_c, кА/м	Остаточная индукция, Т	Отношение B/H в точке $(BH)_{макс}/2$ × $\times 10^{-3}$ Т/кА/м
ЮНД4	3,6	40	0,50	12,0—16,0
ЮНД8	5,1	44	0,60	13,0—16,0
ЮНТС	4,0	58	0,43	7,0—10,0
ЮНДК15	6,0	48	0,75	15,5—18,0
ЮНДК18	9,7	55	0,90	15,0—20,0
ЮНДК18С	14	44	1,10	22,0—28,0
ЮН13ДК24С	18	36	1,30	30,0—33,0
ЮН13ДК24	18	40	1,25	25,0—27,5
ЮН14ДК24	18	48	1,20	20,0—22,0
ЮН15ДК24	18	52	1,15	15,0—17,5
ЮН14ДК24Т2	15	60	1,10	16,0—19,0
ЮН13ДК25А	28	44	1,40	27,5—30,0
ЮН14ДК25А	28	52	1,35	24,0—25,0
ЮН13ДК25БА	28	48	1,40	26,5—27,5
ЮН14ДК25БА	28	58	1,30	21,5—24,5
ЮН15ДК25БА	28	62	1,25	16,5—21,5
ЮНДК31Т3БА	32	92	1,15	11,0—14,0
ЮНДК34Т5	14	92	0,75	8,0—11,0
ЮНДК35Т5Б	16	96	0,75	8,0—10,0
ЮНДК35Т5	18	110	0,75	7,0—8,0
ЮНДК35Т5БА	36	110	1,02	8,0—9,0
ЮНДК35Т5АА	40	115	1,05	8,0—9,0
ЮНДК38Т7	18	135	0,75	4,5—5,5
ЮНДК40Т8	18	145	0,70	3,5—4,5
ЮНДК40Т8АА	32	145	0,90	4,0—5,0

Примечание. В обозначении марок сплавов буквы означают: Б — ниобий; Д — медь; К — кобальт; Н — никель; С — кремний; Т — титан; Ю — алюминий; А — столбчатая кристаллическая структура; АА — монокристаллическая структура. Цифры указывают на процентное содержание элемента.

ПРИЛОЖЕНИЕ VI

Выписка из таблицы стандартной атмосферы по ГОСТ 4401—48

H, км (высота)	p, мм рт. ст. (давление)	ϑ, °С (температура воздуха)	γ, кг/м³ (объемная масса воздуха)	$\rho = \gamma/g$, кг·с²/м⁴ (где $g = 9{,}80$ м/с²)
0	760	0	1,293	—
0	760	+15	1,225	0,1249
11	169	—56,5	0,363	0,0371
15	90,0	—56,5	0,193	0,0197
20	41,0	—56	0,089	0,00896
25	19,0	—50	0,041	0,00407
30	9,0	—40	0,019	0,00185
50	0,68	+10	0,0013	0,000134

ПРИЛОЖЕНИЕ VII

Предпочтительные числа и их ряды по ГОСТ 8032—56

В соответствии с таблицей, приведенной ниже, числа свыше 10 получаются умножением на 10; 100; 1000 и т. д., а числа менее 1 — умножением на 0,1; 0,01; 0,001 и т. д.

Обозначение рядов: *R*5, *R*10, *R*20 и *R*40.

Основные ряды				Номер предпочтительного числа
*R*5	*R*10	*R*20	*R*40	
1,00	1,00	1,00	1,00	0
			1,06	1
		1,12	1,12	2
			1,18	3
	1,25	1,25	1,25	4
			1,32	5
		1,40	1,40	6
			1,50	7
1,60	1,60	1,60	1,60	8
			1,70	9
		1,80	1,80	10
			1,90	11
	2,00	2,00	2,00	12
			2,12	13
		2,24	2,24	14
			2,36	15
2,50	2,50	2,50	2,50	16
			2,65	17
		2,80	2,80	18
			3,00	19
	3,15	3,15	3,15	20
			3,35	21
		3,55	3,55	22
			3,75	23
4,00	4,00	4,00	4,00	24
			4,25	25
		4,50	4,50	26
			4,75	27
	5,00	5,00	5,00	28
			5,30	29
		5,60	5,60	30
			6,00	31
6,30	6,30	6,30	6,30	32
			6,70	33
		7,10	7,10	34
			7,50	35
		8,00	8,00	36
			8,55	37
		9,00	9,00	38
			9.50	39
10,00	10.00	10.00	10,00	40

ПРИЛОЖЕНИЕ VIII

Номинальные диаметры и длины в машиностроении по ГОСТ 6636—69

В стандарте установлены предпочтительные ряды размеров, представляющие собой геометрические прогрессии со знаменателями $\sqrt[5]{10}$; $\sqrt[10]{10}$; $\sqrt[20]{10}$ и $\sqrt[40]{10}$ с необходимыми округлениями.

Обозначение рядов: *R*5*a*; *R*10*a*; *R*20*a* и *R*40*a*.

Ряд *R*5*a*	Ряд *R*10*a*	Ряд *R*20*a*	Ряд *R*40*a*	Ряд *R*5*a*	Ряд *R*10*a*	Ряд *R*20*a*	Ряд *R*40*a*
0,001	0,001	0,001	0,001	0,025	0,025	0,025	0,025 0,026
		0,002	0,002 0,003			0,028	0,028 0,030
	0,004	0,004	0,004 0,005		0,032	0,032	0,032 0,034
		0,006	0,006 0,007			0,036	0,036 0,038
0,008	0,008	0,008	0,008 0,009	0,04	0,04	0,04	0,040 0,042
		0,01	0,01 0,011			0,045	0,045 0,048
	0,012	0,012	0,012 0,013		0,05	0,05	0,050 0,052
		0,014	0,014 0,015			0,056	0,056 0,058
0,016	0,016	0,016	0,016 0,017	0,063	0,063	0,063	0,063 0,065
		0,018	0,018 0,019			0,071	0,071 0,075
	0,020	0,020	0,020 0,021		0,08	0,080	0,080 0,085
		0,022	0,022 0,024			0,090	0,090 0,095
0,1	0,1	0,1	0,1 0,105	0,63	0,630	0,630	0,630 0,650
		0,110	0,110 0,115			0,710	0,710 0,750

Ряд *R*5*a*	Ряд *R*10*a*	Ряд *R*20*a*	Ряд *R*40*a*	Ряд *R*5*a*	Ряд *R*10*a*	Ряд *R*20*a*	Ряд *R*40*a*
	0,12	0,12	0,120 0,130		0,800	0,800	0,800 0,850
		0,140	0,140 0,150			0,900	0,900 0,950
0,16	0,16	0,16	0,160 0,170	1,0	1,0	1,0	1,0 1,05
		0,180	0,180 0,190			1,1	1,1 1,15
	0,200	0,200	0,200 0,210		1,2	1,2	1,2 1,3
		0,220	0,220 0,240			1,4	1,4 1,5
0,25	0,250	0,250	0,250 0,260	1,6	1,6	1,6	1,6 1,7
		0,280	0,260 0,300			1,8	1,8 1,9
	0,320	0,320	0,320 0,340		2,0	2,0	2,0 2,1
		0,360	0,360 0,380			2,2	2,2 2,4
0,4	0,400	0,400	0,400 0,420	2,5	2,5	2,5	2,5 2,6
		0,450	0,450 0,480			2,8	2,8 3,0
	0,500	0,500	0,500 0,520		3,2	3,2	3,2 3,4
		0,560	0,560 0,580			3,6	3,6 3,8

Ряд $R5a$	Ряд $R10a$	Ряд $R20a$	Ряд $R40a$	Ряд $R5a$	Ряд $R10a$	Ряд $R20a$	Ряд $R40a$
4,0	4,0	4,0	4,0 4,2	25	25	25	25 26
		4,5	4,5 4,8			28	28 30
	5,0	5,0	5,0 5,2		32	32	32 34
		5,6	5,6 5,0			36	36 38
6,3	6,3	6,3	6,3 6,5	40	40	40	40 42
		7,1	7,1 7,5			45	45 48
	8	8	8 8,5		50	50	50 53
		9	9 9,5			56	56 60
10	10	10	10 10,5	63	63	63	63 65
		11	11 11,5			71	71 75
	12	12	12 13		80	80	80 85
		14	14 15			90	90 95
16	16	16	16 17	100	100	100	100 105
		18	18 19			110	110 120
	20	20	20 21		125	125	125 130
		22	22 24			140	140 150

Основные технические данные малых электродвигателей постоянного тока параллельного возбуждения типа ПЛ

Тип двигателя	Номинальные данные					Масса двигателя, кг, при форме исполнения		Момент инерции якоря, кг·см²
	Мощность на валу, Вт	Скорость вращения, об/мин	Ток, А, при напряжении, В		К. п. д., %			
			110	220		Щ2/Ф3	Ф3	
ПЛ 051	30	2700	0,68	0,34	40	2,1	2,0	1,25
ПЛ 052	50	2700	0,96	0,48	47	2,6	2,5	1,75
ПЛ 061	80	2700	1,4	0,7	52	3,7	3,6	3,25
ПЛ 062	120	2700	1,9	0,95	57	4,5	4,4	4,0
ПЛ 071	180	2700	2,7	1,35	61	5,9	5,7	7,0
ПЛ 072	270	2700	3,8	1,9	65	7,3	7,1	8,75
ПЛ 061	400	2700	5,4	2,7	68	9,3	9	16,25
ПЛ 082	600	2700	7,6	3,8	72	12,5	12,2	22,0
ПЛ 061	50	1400	0,9	0,45	50	3,8	3,7	3,25
ПЛ 062	80	1400	1,3	0,65	55	4,5	4,4	4,0
ПЛ 071	120	1400	1,9	0,95	58	6,1	5,9	7,0
ПЛ 072	180	1400	2,6	1,3	64	7,5	7,3	8,75
ПЛ 081	270	1400	3,8	1,9	66	9,5	9,2	16,25
ПЛ 082	400	1400	5,0	2,5	72	12,6	12,3	22,0

Примечание. Электродвигатели типа ПЛ имеют защищенное исполнение; оболочка двигателей из алюминия; формы исполнения: Щ2/Ф3 — на лапах с фланцем на щите; Ф3 — без лап с фланцем на щите.

Основные размеры (в миллиметрах) малых электродвигателей постоянного тока параллельного возбуждения типа ПЛ (форма испытания Щ2/Ф3)

Тип двигателя	Вылет лап по ширине, B_1	Вылет гаек щеткодержателей, B_2	Наружный диаметр корпуса, D	Диаметр конца вала, d	Высота корпуса без фильтра, H_1	Высота корпуса с фильтром, H_2	Высота оси вала, h	Длина корпуса с концом вала, L	Длина конца вала, l
ПЛ 051	100	94	88,5	8	122	134	53	168	20
ПЛ 052	100	94	88,5	8	122	134	53	183	20
ПЛ 061	115	112	106	10	140	154	63	202	23
ПЛ 062	115	112	106	10	140	154	63	218	23
ПЛ 071	135	130	125	12	170	175	75	238	30
ПЛ 072	135	130	125	12	170	175	75	258	30
ПЛ 081	165	156	151	14	197	204	90	262	30
ПЛ 062	165	156	151	14	197	204	90	298	30

Примечание. Электродвигатели типа ПЛ в форме исполнения Ф3, в отличие от электродвигателей в форме исполнения Щ2/Ф3, не имеют лап. Размеры B_2, D, d, L, l электродвигателей в форме исполнения Ф3 такие же, как и у двигателей в форме исполнения Щ2/Ф3.

ПРИЛОЖЕНИЕ X

Основные технические данные исполнительных электродвигателей постоянного тока типа СЛ

Система возбуждения	Тип двигателя	Номинальные данные: напряжение, В	Номинальные данные: мощность на валу, Вт	Номинальные данные: скорость вращения, об/мин	Номинальные данные: вращающий момент, кг·см	Номинальные данные: ток возбуждения, А	Номинальные данные: ток якоря, А	Момент инерции якоря, кг·см²	Габариты, мм: длина корпуса с концом вала	Габариты, мм: наружный диаметр корпуса	Габариты, мм: длина конца вала	Габариты, мм: диаметр конца вала	Масса, кг
Параллельное возбуждение	СЛ-121	110	5	4800	0,14	0,07	0,21	0,039	82	50	6,5	4	0,44
	СЛ-161	110	7	4800	0,21	0,08	0,22	0,053	94	50	7,0	4	0,50
	СЛ-221	110	13	3600	0,36	0,05	0,22	0,14	104	70	9,5	6	0,90
	СЛ-261	110	24	3600	0,85	0,08	0,42	0,2	115	70	9,5	6	1,25
	СЛ-281	24	26	5200	0,50	0,26	2,40	0,2	126,5	70	10	6	1,25
	СЛ-321	110	38	3000	1,25	0,11	0,70	0,6	123	85	13	8	1,70
	СЛ-361	110	50	3000	1,60	0,08	0,85	0,7	133	85	13	8	1,95
	СЛ-521	110	77	3000	2,50	0,1	1,2	1,7	148	108	16	10	3,3
	СЛ-569	110	175	3400	4,75	0,11	2,2	2,7	173	108	16	10	4,5
	СЛ-821	110	172	2400	7,00	0,16	2,2	6,75	188	130	16	10	7,5
	СЛ-851	110	230	2400	9,25	0,18	3,4	9,35	218	130	16	10	9,7
Параллельное возбуждение для потенциометрических схем	СЛ-267	110	27	3800	0,65	0,08	0,9	0,2	115	70	9,5	6	1,25
	СЛ-367	110	32	2500	1,25	0,08	1,0	0,7	133	85	13	8	2,0
Параллельное возбуждение стабилизированной скорости (с центробежным регулятором)	СЛ-240	22	18,5	4500	0,40	0,32	2,5	—	156	70	9,5	6	1,4
	СЛ-360	110	23	4500	0,50	0,06	0,6	0,75	180	85	13	8	2,2
	СЛ-370	22	28	4500	0,60	0,32	3,0	0,75	180	85	13	8	2,2
	СЛ-570	110	77	3000	2,50	0,15	1,2	3.6	248	108	16	10	6,16
Последовательное возбуждение (нереверсивные)	СЛ-526	110	78	3800	2,0	1,2	1,2	1,7	196	108	36	9	3,3
	СЛ-525А	24	30	2800	1.0	3,0	3,0	1,7	173	108	16	10	3,3
Последовательное возбуждение (реверсивные)	СЛ-163	110	10	3500	0.23	0,26	0,26	0,053	100	50	7	4	0,55
	СЛ-523	110	74	3000	0,24	1,1	1,1	1,7	148	108	16	10	3,3
	СЛ-563	110	110	3800	0,28	1.5	1.5	2.7	173	108	16	10	4,5
Двигатель с постоянными магнитами	СЛ-М	24	2	5700	0,035	—	0.3	0,0024	—	33	—	—	0,2

ПРИЛОЖЕНИЕ XI

Основные технические данные малых электродвигателей постоянного тока с постоянными магнитами серии ДПМ при различном напряжении питающей сети

Тип двигателя	Скорость вращения n, об/мин	Момент на валу, M, кг·см	Потребляемый ток I, А	M, кг·см	I, А	M, кг·см	I, А	M, кг·см	I, А	Диаметр корпуса, мм	Длина корпуса без конца вала, мм	Масса, кг
		$U = 36$ В		$U = 27$ В		$U = 12$ В		$U = 6$ В				
ДПМ-20	9000	0,016	0,17	0,016	0,2	0,010	0,35	0,010	0,7	20	38	0,065
	7500	0,017	0,15	0,017	0,19	0,013	0,33	0,013	0,67			
	6000	0,018	0,13	0,018	0,16	0,015	0,31	0,015	0,62			
	4500	0,020	0,11	0,020	0,14	0,016	0,25	0,016	0,5			
ДПМ-25	9000	0,035	0,25	0,035	0,36	0,025	0,55	0,025	1,3	25	45,5	0,12
	7500	0,042	0,23	0,042	0,34	0,030	0,58	0,030	1,15			
	6000	0,044	0,21	0,044	0,28	0,035	0,52	0,035	1,05			
	4500	0,046	0,17	0,046	0,22	0,040	0,45	0,040	0,85			
	2500	0,055	0,12	0,055	0,15	0,050	0,35	0,050	0,65			
ДПМ-30	9000	0,08	0,41	0,080	0,55	0,055	1,0	0,055	2,0	30	57	0,22
	7500	0,09	0,38	0,090	0,51	0,070	0,9	0,070	1,8			
	6000	0,095	0,32	0,095	0,45	0,075	0,8	0,075	1,6			
	4500	0,010	0,25	0,010	0,34	0,085	0,65	0,085	1,4			
	2500	0,013	0,18	0,013	0,24	0,110	0,5	0,110	1,0			
ДПМ-35	9000	0,15	0,65	0,150	0,85	0,105	1,35	0,105	2,7	35	64,5	0,34
	7500	0,165	0,6	0,185	0,76	0,125	1,3	0,125	2,6			
	6000	0,180	0,51	0,180	0,67	0,145	1,25	0,145	2,5			
	4500	0,185	0,4	0,185	0,55	0,155	1,0	0,155	2,0			
	2500	0,210	0,25	0,210	0,4	0,180	0,7	0,180	1,5			

ПРИЛОЖЕНИЕ XII

Основные технические данные электромашинных усилителей с поперечным полем

Тип	Мощность, Вт	Напряжение, В	Ток, А	К. п. д.	Обмотки управления					Данные приводного двигателя			
					Ток, мА	Число	Сопротивление каждой обмотки, Ом	Входная мощность, Вт	Коэффициент усиления мощности	род тока	напряжение, В	Ток, А	Скорость вращения, об/мин
ЭМУ-0,3П	300	60	5,0	0,65	10	2	1300	0,13	2300	Постоянный	24	27	5000
		100	2,7					0,13			110	5,5	
ЭМУ-0,5П	700	60	11,6	0,75	9,5	2	1600	0,15	4600	Постоянный	24	52	5000
		110	6,3		12,5			0,25	2200		110	11	
ЭМУ-0,5А	500	60	8,3	0,7	9,5	2	1600	0,15	3300	Трехфазный	127	5,7	2850
		110	4,5		12,5			0,25	2000		220/380	3,3/1,9	
ЭМУ-1,2П	1600	110	14,5	0,8	8	2	4000	0,25	6400	Постоянный	110	23	4000
ЭМУ-1,2А	1200	110	10,9	0,78	8	2	4000	0,25	4800	Трехфазный	127	10,5	
											220/380	6,05/3,5	2850

Примечание. Приводной двигатель располагается в одном корпусе с усилителем.

ПРИЛОЖЕНИЕ XIII

Основные технические данные малых универсальных коллекторных электродвигателей в защищенном исполнении типа УЛ

Тип двигателя	Мощность на валу, Вт	Скорость вращения, об/мин	Ток двигателя, А, при нормальном напряжении				К. п. д., %		cos φ	Масса, кг, при форме исполнения		Момент инерции ротора, кг·см²
			110~ В	127~ В	210~ В	220~ В	на постоянном токе	на переменном токе		Щ2/Ф3	Ф3	
УЛ-02	10	8000	0,27	0,25	0,14	0,15	34	34	0,9	0,44	0,42	0,04
УЛ-03	18	8000	0,41	0,39	0,2	0,23	40	40	0,9	0,66	0,63	0,125
УЛ-041	30	8000	0,54	0,55	0,27	0,32	50	50	0,85	1,15	1,1	0,375
УЛ-042	50	8000	0,82	0,84	0,41	0,49	55	55	0,85	1,4	1,35	0,5
УЛ-051	80	8000	1,25	1,28	0,63	0,74	58	58	0,85	2,1	2,0	1,25
УЛ-052	120	8000	1,82	1,85	0,9	1,1	60	60	0,85	2,6	2,5	1,75

Продолжение таблицы

Тип двигателя	Мощность на валу, Вт	Скорость вращения, об/мин	Ток двигателя, А, при нормальном напряжении				К. п. д., %		cos φ	Масса, кг, при форме исполнения		Момент инерции ротора, кг·см²
			110— В	127~ В	210— В	220~ В	на постоянном токе	на переменном токе		Ш2/Ф3	Ф3	
УЛ-061	180	8000	2,64	2,68	1,3	1,6	62	62	0,85	3,7	3,5	3,25
УЛ-062	270	8000	3,84	3,7	1,9	2,1	64	64	0,9	4,4	4,2	4,0
УЛ-071	400	8000	5,7	5,45	2,85	3,15	64	64	0,9	5,8	5,6	7,0
УЛ-072	600	8000	8,55	8,15	4,3	4,7	64	64	0,9	7	6,8	8,75
УЛ-02	5	5000	0,2	0,21	0,1	0,12	22	22	0,86	0,44	0,42	0,04
УЛ-03	10	5000	0,31	0,32	0,15	0,19	30	30	0,82	0,66	0,63	0,125
УЛ-041	18	5000	0,45	0,49	0,23	0,28	36	36	0,8	1,15	1,1	0,375
УЛ-042	30	5000	0,62	0,71	0,31	0,41	44	44	0,75	1,4	1,35	0,50
УЛ-051	50	5000	0,93	1,07	0,46	0,62	49	49	0,75	2,1	2,0	1,25
УЛ-052	80	5000	1,3	1,5	0,64	0,55	56	56	0,75	2,6	2,5	1,75
УЛ-061	120	5000	1,92	2,46	0,9	1,3	57	57	0,75	3,8	3,6	3,25
УЛ-062	180	5000	2,82	3,26	1,4	1,9	58	56	0,75	4,5	4,3	4,0
УЛ-071	270	5000	3,96	4,3	2,0	2,5	62	62	0,8	5,9	5,7	7,0
УЛ-072	400	5000	5,5	5,95	2,8	3,4	66	56	0,8	7,1	6,9	8,75
УЛ-041	5	2700	0,15	0,2	0,08	0,11	30	25	0,7	1,15	1,1	0,375
УЛ-042	10	2700	0,23	0,27	0,11	0,16	40	36	0,7	1,4	1,35	0,5
УЛ-051	18	2700	0,33	0,5	0,16	0,29	50	40	0,7	2,1	2,0	1,25
УЛ-052	30	2700	0,47	0,75	0,23	0,43	53	45	0,7	2,6	2,5	1,75
УЛ-061	50	2700	0,81	1,18	0,4	0,67	56	48	0,7	3,9	3,7	3,25
УЛ-062	80	2700	1,25	1,88	0,63	1,1	58	48	0,7	4,6	4,4	4,0
УЛ-071	120	2700	1,82	2,58	0,91	1,5	60	52	0,7	6,1	5,9	7,0
УЛ-072	180	2700	2,48	3,6	1,2	2,1	55	56	0,7	7,4	7,2	8,75
УЛ-081	270	2700	3,5	5	1,7	2,9	70	60	0,7	9,5	9,2	16,25
УЛ-082	400	2700	5,0	6,9	2,5	4,0	72	65	0,7	12,6	12,3	22,0

Примечания: 1. Электродвигатели УЛ рассчитаны на работу как от сети постоянного, так и переменного тока частотой 50 Гц.

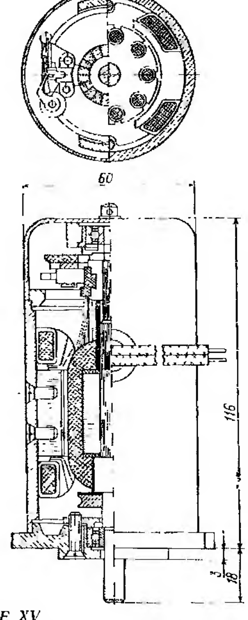
2. Они имеют алюминиевую оболочку и выпускаются в двух формах исполнения: Ш2/Ф3 — на лапах с фланцем на щите и Ф3 — без лап с фланцем на щите.

3. Электродвигатели УЛ рассчитываются на два различных напряжения переменного и постоянного тока (на 127~ В и 110— В или на 220~ В и 210— В).

4. Электродвигатели УЛ выпускаются как с радиопомехоподавляющими устройствами (фильтрами), так и без них.

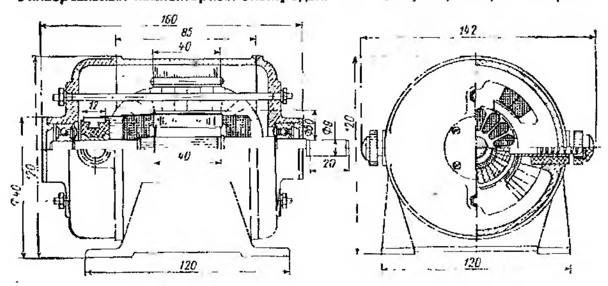
ПРИЛОЖЕНИЕ XIV

Электродвигатель постоянного тока 40 Вт, 27 В, 6000 об/мин



ПРИЛОЖЕНИЕ XV

Универсальный коллекторный электродвигатель 40 Вт, 120/110 В, 3000 об/мин



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арнольд Э.** Машины постоянного тока. Т. I и II. М.—Л., Гостехиздат, 1931. 496 с. и 508 с. с ил.
2. **Метцлер К.** Расчет универсальных коллекторных двигателей. М.—Л., Госэнергоиздат, 1932. 100 с. с ил.
3. **Рихтер Р.** Электрические машины. Т. 1. М.—Л., ОНТИ, 1935. 508 с. с ил.
4. **Ермолин Н. П.** Расчет электродвигателей постоянного тока и универсальных коллекторных двигателей малой мощности. ЛЭТИ имени В. И. Ульянова (Ленина), 1940. 64 с ил.
5. **Ермолин Н. П.** Переходные процессы в машинах постоянного тока. М.—Л., Госэнергоиздат, 1951. 190 с. с ил.
6. **Касьянов В. Т.** Расчет электрических машин постоянного тока. Л., ВМА, 1952. 212 с. с ил.
7. **Ермолин Н. П.** Расчет маломощных коллекторных машин. М.—Л., Госэнергоиздат, 1955. 168 с. с ил.
8. **Ермолин Н. П.** Основные принципы проектирования серии маломощных электродвигателей постоянного тока, «Известия ЛЭТИ», вып. XXVII, 1955, с. 5—11 с ил.
9. **Ермолин Н. П.** Стабилизация скорости вращения маломощных электродвигателей постоянного тока.— «Известия ЛЭТИ», 1958, вып. XXXIV, с. 133—142 с ил.
10. **Ермолин Н. П.** Основы расчета маломощной реверсивной установки с большим маховым моментом на валу исполнительного электродвигателя.— «Известия ЛЭТИ», 1958, вып. XXXV, с. 9—26 с ил.
11. **Бертинов А. И., Ризник Г. А.** Проектирование авиационных электрических машин постоянного тока. М., Оборонгиз, 1958. 424 с. с ил.
12. **Ермолин Н. П.** Электрические машины малой мощности. М., «Высшая школа», 1962 и 1967. 492 с. и 504 с. с ил.
13. **Электрические** машины малой мощности. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963, 432 с. с ил. Авт.: Д. А. Завалишин и др.
14. **Захарьян В. М.** Некоторые особенности расчета магнитной цепи малых электрических машин.— «Электротехника», 1963, № 12, с. 62—67 с ил.
15. **Верхопятницкий П. Д.** Электрические элементы автоматики. Л., Судпромгиз, 1963. 536 с. с ил.
16. **Электрические** машины с постоянными магнитами. М.—Л., «Энергия», 1964. 480 с. с ил. Авт.: В. А. Балагуров и др.
17. **Микродвигатели** для систем автоматики. Справочник под ред. Э. А. Лодочникова и Ф. М. Юферова. М., «Энергия», 1969. 272 с. с ил.
18. **Постоянные** магниты. Справочник под ред. Ю. М. Пятина. М., «Энергия», 1971. 376 с. с ил.